UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

ESCUELA DE CIENCIAS BASICAS, TECNOLOGIA E INGENIERIA.

208042 – ACUSTICA Y FUNDAMENTOS DEL SONIDO (E-Learning)

Ing. Juan Gabriel Cabrera Ortiz.

Acreditador

Ing. Milton Eduardo Salgado.

BOGOTA

Diciembre de 2010

INDICE DE CONTENIDO

UNIDAD 1

Nombre de la Unidad	**FUNDAMENTOS DEL SONIDO.**
Introducción	
Denominación de capítulo 1	EL OÍDO HUMANO
Denominación de Lección 1	Generalidades del Oído Humano.
Denominación de Lección 2	Audición Humana.
Denominación de Lección 3	Estructura Y Función Del Oído.
Denominación de Lección 4	Enfermedades, Lesiones y cuidados del sistema auditivo.
Denominación de capítulo 2	CONCEPTOS BASICOS DEL SONIDO
Denominación de Lección 5	Conceptos básicos del sonido.
Denominación de Lección 6	Que es Sonido
Denominación de Lección 7	Representación grafica del Sonido.
Denominación de Lección 8	Amplitud, Periodo Frecuencia
Denominación de Lección 9	Envolvente y Formas de onda
Denominación de Lección 10	Longitud de onda y Velocidad de sonido.
Denominación de Lección 11	Espectro y Bandas De octava
Denominación de capítulo 3	DECIBELES
Denominación de Lección 12	Generalidades de los decibeles.
Denominación de Lección 13	El Decibel.
Denominación de Lección 14	Nivel de presión sonora SPL.
Denominación de Lección 15	Suma de decibeles.

UNIDAD 2

Nombre de la Unidad	**FUNDAMENTOS DE LA ACÚSTICA.**
Introducción	
Denominación de capítulo 4	RUIDO DE FONDO Y CLASES DE RUIDO.

Denominación de Lección 16	Generalidades del Ruido.
Denominación de Lección 17	Rudio De Fondo.
Denominación de Lección 18	Tipos de Ruido.
Denominación de Lección 19	Ruido Rosa, Ruido Blanco y Ruido Café.
Denominación de capítulo 5	ACUSTICA Y FENOMENOS ACUSTICOS.
Denominación de Lección 20	Historia y definición de la acústica.
Denominación de Lección 21	Generalidades Fenómenos Acústicos.
Denominación de Lección 22	Reflexión Sonora.
Denominación de Lección 23	Absorción Sonora.
Denominación de Lección 24	Difracción Sonora.
Denominación de Lección 25	Transmisión Sonora.
Denominación de Lección 26	Efecto Doppler.
Denominación de capítulo 6	MEDICION ACUSTICA, INSTRUMENTACION Y NORMATIVIDAD.
Denominación de Lección 27	Generalidades Medición Acústica.
Denominación de Lección 28	Medición Acústica.
Denominación de Lección 29	Instrumentos de Medición.
Denominación de Lección 30	Normatividad.

UNIDAD 3

Nombre de la Unidad	**PROPAGACION DEL SONIDO Y PARAMETROS ACUSTICOS.**
Introducción	
Denominación de capítulo 7	SONIDO AL AIRE LIBRE, LEY DEL INVERSO CUADRADO
Denominación de Lección 31	Generalidades del Sonido al aire Libre.
Denominación de Lección 32	Propagación del sonido al aire Libre.
Denominación de Lección 33	Ley del inverso cuadrado.
Denominación de capítulo 8	SONIDO EN RECNITOS.
Denominación de Lección 34	Generalidades del Sonido en recintos.
Denominación de Lección 35	Propagación del Sonido en recintos
Denominación de Lección 36	Modos de Resonancia.
Denominación de Lección 37	Distancia Crítica.
Denominación de capítulo 9	PARAMETROS ACUSTICOS.
Denominación de Lección 38	Generalidades de los Parámetros acústicos.
Denominación de Lección 39	Tiempo de Reverberación y Coeficiente de absorción.
Denominación de Lección 40	Sonoridad.
Denominación de Lección 41	Claridad.
Denominación de Lección 42	Inteligibilidad.
Denominación de Lección 43	Nivel Continuo Equivalente Leq.

UNIDAD 4

Nombre de la Unidad	**MATERIALES, ACONDICIONAMIENTO Y SIMULACION ACUSTICA**
Introducción	
Denominación de capítulo 10	MATERIALES ACÚSTICOS.
Denominación de Lección 44	Generalidades de los materiales acústicos
Denominación de Lección 45	Resonadores de membrana.
Denominación de Lección 46	Trampa de Graves.
Denominación de Lección 47	Difusores.
Denominación de Lección 48	Materiales Fono absorbentes.
Denominación de capítulo 11	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.
Denominación de Lección 49	Generalidades del Acondicionamiento Acústico.
Denominación de Lección 50	Aislamiento e insonorización.
Denominación de Lección 51	Perdida por Transmisión.
Denominación de Lección 52	Tratamiento acústico.
Denominación de Lección 53	Acústica Arquitectónica.
Denominación de capítulo 12	SIMULACIÓN Y DISEÑO ACÚSTICO.
Denominación de Lección 54	Generalidades de la Simulación acústica
Denominación de Lección 55	Parámetros de Diseño acústico.
Denominación de Lección 56	Diseño Acústico.
Denominación de Lección 57	Simulación acústica a través de software.
Denominación de Lección 58	Auralización.
Denominación de Lección 59	Simulación acústica a escala

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Amplitud de los primeros 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

Tabla 2. Comparación de números expresados en formas decimal, aritmética y exponencial**.**

Tabla 3.Valor de la presión correspondiente a varios niveles de presión sonora.

Tabla 4. Tiempo de Reverberación recomendado para distintas salas.

LISTADO DE GRÁFICOS Y FIGURAS

GRAFICOS.

Grafico 1. Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Grafico.2. Una perturbación de la superficie del agua en una pileta inicialmente en calma se propaga como una circunferencia de radio cada vez mayor.

Grafico 3. El oscilograma de un sonido, en el cual pueden apreciarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y en el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

Grafico 4. Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir 1 s, se cuentan 12 ciclos, por lo cual la frecuencia es de 12 Hz.

Grafico 5. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente amplitud. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud.

Grafico 6. Representación grafica de una onda con periodo en 1 Segundo.

Grafico 7. Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la envolvente, curva que une los picos de cada ciclo.

Grafico 8. Tres ciclos de una onda cuadrada.

Grafico 9. Tres ciclos de un tren de pulsos al 25%.

Grafico 10. Tres ciclos de una onda triangular.

Grafico 11. Tres ciclos de una onda diente de sierra.

Grafico 12. Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

Grafico 13. Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, periódica. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia ʎ (longitud de onda). (d) Tercera perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia 2ʎy la segunda una distancia ʎ. (e) Cuarta perturbación, cuando las anteriores han recorrido las distancias 3ʎ, 2ʎ, y ʎ respectivamente.

Grafico 14. (a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia fo, cuyas frecuencias son fo, 3fo y 5fo. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

Grafico 15.Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz. Esta onda tiene únicamente armónicos impares.

Grafico 16. Ejemplo de espectro continúo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la densidad espectral, que representa la energía en función de la frecuencia.

Grafico 17. Espectro sonoro promediado en bandas de octava.

Grafico 18. Espectro sonoro promediado en bandas de tercio de octava.

Grafico 19. Representación grafica del Ruido Rosa.

Grafico 20. Representación grafica del Rudio Marrón.

Grafico 21. Representación grafica del Ruido Blanco

Grafico 22. Representación de una onda propagada al aire libre, intensidad vs distancia.

Grafico 23. Respuesta en frecuencia de una sala.

Grafico 24. Distancia Crítica.

Grafico 25. Representación grafica del Tiempo de Reverberación.

Grafico 26. Perdida de Por transmisión de una Pared Simple.

FIGURAS.

Figura 1. Esquema del Oído Humano

Figura 2. Anatomía del Oído Humano.

Figura 3. Ejemplo de Ruido Continuo.

Figura 4. Ejemplo de Ruido Intermitente.

Figura 5. Ejemplo de Ruido Impulsivo.

Figura 6. Ejemplo de Tonos en El ruido.

Figura 7. Ejemplo de Ruido en Baja Frecuencia.

Figura 8. Ejemplo de una reflexión especular.

Figura 9. Representación Grafica de la Ley de la Reflexión.

Figura 10. Esquema de disipacion de energia sonora en un muro de concreto.

Figura 11. Ejemplo de de difracción sonora (flechas Blancas).

Figura 12. Diagrama que muestra el origen de las pulsaciones. La onda C es una superposición de ondas A y B.

Figura 13. Representación gráfica de ondas sonoras emitidas desde una fuente fija.

Figura 14. Ilustración del efecto Doppler. Las ondas frente a una fuente en movimiento están más cercanas entre sí que las ondas que se propagan detrás de la fuente móvil.

Figura 15.Cálculo de la magnitud de la longitud de onda del sonido que se emite desde una fuente en movimiento. La velocidad de la fuente Vs se considera positiva para velocidades de acercamiento y negativa para velocidades de alejamiento.

Figura 16. Sonómetro.

Figura 17. Microfono de medición.

Figura 18. Calibrador 94dB.

Figura 19. Fuente de medición, Dodecaedro.

Figura 20. Ejemplo de propagación de una fuente al aire libre.

Figura 21. Modos Axiales.

Figura 22. Modos Tangenciales.

Figura 23. Modos Oblicuos.

Figura 24. Esquema de un estudio de grabación.

Figura 25. Resonador de Membrana puesto sobre un muro.

Figura 26. Resonador de Membrana.

Figura 27. Trampa de Graves Auralex (unidad comercial).

Figura 28. Difusor Convexo.

Figura 29. Difusor QRD.

Figura 30. Difusor Birradial (Dos dimensiones).

Figura 31. Difusores Perforados (Pared del Fondo).

Figura 32. Material Fono Absorbente.

Figura 33. Reflexión del sonido con paneles reflejantes.

Figura 34. Simulación de un teatro en Odeón. (Software de Simulación Acústica).

Figura 35. Proceso de simulación acústica de recintos.

ASPECTOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL Y VERSIONAMIENTO

El presente módulo fue diseñado en el año 2010 por el Ingeniero de Sonido Juan Gabriel Cabrera Ortiz, docente de la UNAD ubicado en la Sede Nacional José Celestino Mutis, Bogotá, y se ha desempeñado como tutor desde el año 2010.

Es la primera versión de este módulo y ha sido diseñado para hacer parte de la carrera de Tecnología de Audio de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

INTRODUCCIÓN

La acústica es la rama de la física que estudia el sonido, se divide en varios subtemas que van desde acústica musical, fisiología del oído humano hasta acústica arquitectónica. Esta materia está implícita en cualquier proceso donde el sonido tenga prelación. Incluso en procesos de audio digital, se debe tener en cuenta la acústica de una grabación o reproducción del sonido ya que de ella dependerá mucho el producto final. Este modulo acerca al estudiante a generar un pensamiento sonoro claro y concordante con el lenguaje y las leyes físicas que rigen al sonido y a la acústica en la actualidad.

UNIDAD I FUNDAMENTOS DEL SONIDO.

Introducción.

Para el desarrollo de este curso empezaremos a ver paulatinamente los conceptos necesarios que involucran al sonido, para poder comprender la acústica más relevante de la actualidad. En esta unidad empezaremos a aprender los conceptos básicos del sonido desde la fisiología del oído humano hasta llegar a las unidades de medida del sonido, los decibeles.

CAPITULO 1: EL OÍDO HUMANO

Lección 1: Generalidades El Oído Humano.

En este capítulo veremos cómo funciona el oído humano, que es la audición humana y las enfermedades y lesiones que podemos sufrir, y sus respectivas maneras de evitarlas y tratarlas.

El oído, es el encargado de recibir los estímulos sonoros, procesarlos y transmitirlos al sistema nervioso central, se lo divide generalmente en tres grandes sectores: oído externo, oído medio y oído interno. El oído externo comprende el pabellón auditivo y el conducto auditivo externo, el cual termina en una delgada membrana denominada tímpano, límite entre el oído externo y el oído medio. El oído medio tiene por pared a dicho tímpano y limita en su parte interna con la ventana oval.

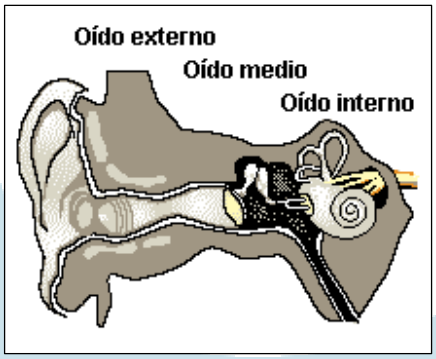

Figura 1. Esquema del Oído Humano

Lección 2: Audición Humana.

El oído humano constituye el último eslabón de la cadena sonora: convierte las ondas sonoras en señales eléctricas que se transmiten por el nervio acústico hasta el cerebro, en donde el sonido es interpretado.

Funcionamiento del oído interno

El vestíbulo posee dos orificios (ventanas oval y redonda) tapados por sendas membranas. La ventana oval está unida al estribo y recibe de él sus vibraciones. La cóclea se divide longitudinalmente por la membrana basilar, sobre la que se asientan los filamentos terminales del nervio auditivo. Cuando el estribo empuja la ventana oval, se produce una sobrepresión en la parte superior de la cóclea que obliga a circular el fluido linfático hacia la cavidad inferior a través del helicotrema, mientras que la membrana basilar se deforma hacia abajo. Finalmente, la membrana elástica que cierra la ventana redonda cede hacia afuera.

Cuando el estribo se mueve hacia la izquierda y la derecha, aumentando y disminuyendo la presión del líquido contenido encima de la membrana basilar, aparece una onda que se desplaza de izquierda a derecha a lo largo de la membrana. Esta onda puede visualizarse como un movimiento de traslación hacia arriba y hacia abajo de la membrana. Su velocidad de avance depende de la frecuencia y de las características de la membrana basilar. En algún punto de la cóclea la velocidad es cero. Cerca de ese punto, la membrana oscila hacia arriba y hacia abajo con mayor fuerza y absorbe la energía de la onda. Cada punto de la membrana basilar responde así a una determinada frecuencia.

Cuando el oído recibe un sonido con varias frecuencias, cada una de ellas excita un punto en la membrana basilar, de modo que el cerebro puede interpretar además de la altura del sonido su timbre, sin más que discernir qué terminaciones nerviosas fueron excitadas y con cuánta intensidad. Es decir, el oído interno funciona como un analizador de sonidos.

Sensación de Intensidad.

Cuando las oscilaciones de presión que alcanzan nuestro oído se encuentran en un determinado rango de frecuencias y de intensidad, se produce la sensación de oír. El intervalo de frecuencias audibles está entre 16 Hz y 20000 Hz aproximadamente.

El oído humano puede acomodarse a intervalos de presiones e intensidades sonoras bastante grandes: entre $2x10^{-5}$ y 20 N/m^2 para la amplitud de la presión y desde 10^{-12} hasta 1 w/m^2 para la intensidad. El valor más bajo en ambos casos se toma como umbral de audición, mientras que el más alto, que produce sensación dolorosa en la mayoría de las personas, es el umbral de dolor. Debido a este gran intervalo al que resulta sensible el oído se utilizan escalas logarítmicas para describir los niveles de presión y de intensidad de una onda sonora.

Enmascaramiento.

Cuando se oyen simultáneamente dos tonos puros, el menos intenso puede resultar inaudible aunque su nivel de intensidad esté por encima del umbral de audición. Se dice que queda enmascarado por el otro sonido. El efecto se nota más para frecuencias cercanas al sonido enmascarador.

Características Direccionales.

El oído humano percibe sonidos que llegan desde cualquier dirección, pero existe cierta dependencia de la intensidad percibida con la dirección de incidencia del sonido. La razón principal es la posición de los oídos que quedan ensombrecidos por la cabeza. Además hay que añadir el efecto que produce la forma de la oreja en la presión sonora que llega al tímpano.

Percepción Del Tono.

Podemos intentar determinar el tono de un sonido de varias formas. Una de ellas es determinar el tono absoluto, es decir decidir cuál es el tono de un sonido o cantar una nota sin referencia externa. Una segunda posibilidad es determinar la separación en frecuencia entre dos tonos, es decir el tamaño del intervalo. La tercera posibilidad es la determinación comparativa de un tono respecto a otro, es decir después de oír dos tonos decidir cuál de ellos es más agudo que el otro. Esta tercera posibilidad, que es la más sencilla, es a la que nos vamos a referir.

Lección 3: Estructura y Función del Oído.

El oído conforma los órganos de equilibrio y audición. También se le denomina órgano vestibulococlear dentro del estudio de la medicina.

Es un órgano que se encuentra muy desarrollado, principalmente en mamíferos inferiores terrestres y acuáticos, tal es el caso de los félidos y los grandes cetáceos en donde, gracias a su evolución fisioanatómica, se han hiperdesarrollado mecanorreceptocitos especializados en destacar el sentido de equilibrio y audición en perfecta armonía. En el caso del ser humano esta evolución no está tan desarrollada.

En conjunto el estudio histoanatómico del oído se divide en tres partes, oído externo, oído medio y oído interno.

Oído Externo.

Se compone en su origen por el pabellón auricular y el conducto auditivo exterior y de la pelvis interiofica

El pabellón auricular está en una base de cartílago elástico recubierto por piel blanda, dicha piel posee abundantes glándulas sebáceas, denominadas como vellosidad del trago, y en su parte medial posee en la arquitectura ósea. Fibras de músculo estriado que se comunican con el conducto auditivo externo, dándole firmeza y apoyo; así como cierta capacidad de movimientos en el ser humano. En el oído animal se puede apreciar dentro del estudio del órgano vestibulococlear de los mamíferos terrestres a los músculos extrínsecos de la oreja.

El conducto auditivo exterior se extiende desde dicho pabellón hacia el tímpano. Dicho meato o conducto mide en un promedio de alrededor de 3.5 cm de largo en el ser humano, y puede medir hasta 7 cm en otros mamíferos. Está compuesto de cartílago elástico, tejido óseo y piel blanda. También se presentan vellosidades del trago que son ciertamente más abundantes en sujetos masculinos. Justo en la piel se localizan glándulas ceruminosas, que son una especie de glándulas sudoríparas apocrinas, siendo las responsables de la producción de cerumen, que

tiene por funciones proteger a la cavidad ótica de agentes extraños, como el polvo, agentes parásitos, agentes virulentos y de ciertos agentes bacterianos; y evitar la maceración de la piel blanda de dicho meato o conducto. El oído medio ayuda al equilibrio de la misma.

Oído Medio.

Se aprecian dentro de su arquitectura anatómica: la cavidad timpánica, la membrana timpánica, los osteocillos óticos (huesecillos del oído), senos y celdas mastoideos, así como la tuba faríngea o faringotimpánica (antes denominada Trompa de Eustaquio).

Dentro de la cavidad timpánica se abarca un seno irregular repleto de aire, este elemento llega desde la nasofaringe por medio de la tuba faringotimpánica, y se encarga de dar acople a la estructura intratimpánica, así como de servir de medio de transporte de frecuencias acústicas. La cavidad timpánica está recubierta por mucosa y una lámina epitelial de tipo plano simple en su parte posterior, pero en el anterior se aprecia un epitelio de tipo cilíndrico ciliado pseudoestratificado con células caliciformes.

La membrana timpánica es de aspecto transparente y separa a la cavidad timpánica del meato auditivo externo. Tiene una estructura ovaloide con un diámetro promedio de alrededor de 1 cm. A la membrana timpánica se le estudian dos porciones; la Pars Tensis o porción estriada y la Pars Laxus o porción laxa. Se compone de tres capas:

Capa intermedia: compuesta por un tejido fibroconectivo conformado en semitotalidad a la membrana timpánica, compuesta por colágena además de fibras elásticas y fibroblastos.

Estrato córneo: es piel que recubre la superficie exterior de la membrana timpánica careciendo de pelos y glándulas, compuesta por epidermis que se posa sobre una capa de tejido conectivo subepidermiana.

Mucosa: reviste a la superficie interior de la capa intermedia de tejido conectivo, con un epitelio de características plano simple.

Los osteocillos óticos son cuatro diminutos huesos denominados por su arquitectura anatómica con el nombre del Martelus (martillo), el Anvilus (yunque), el Lenticulens (lenticular), y el Estribalis (estribo). El estribo es el hueso más pequeño del cuerpo humano. Éstos conforman una cadena que se extiende desde la membrana timpánica hasta la ventana ovaloide. Los osteocillos están compuestos por tejido óseo compacto y cartílago hialino. La función de los osteocillos óticos y la membrana timpánica es la transformación de ondas sonoras que viajan por medio del aire en la cavidad timpánica a ondas sónicas que viajen por medio del líquido perilinfático del oído interno. Cuando las ondas sonoras penetran el oído medio, el martillo golpea al yunque y este golpea al estribo inmediatamente, haciendo comunicación entre estos 3 huesecillos; después de este proceso el sonido pasa por la ventana oval y la ventana circular.

Oído Interno.

También denominado labyrinthus, se divide a su vez en labyrinthus osseus (óseo) y labyrinthus captivus (membranoso). En el labyrinthus osseus los conductillos semicirculares pertenecen al órgano propio del equilibrio, mientras que la coclearis o caracola pertenece al órgano de la audición. El labyrinthus osseus contiene un líquido linfático denominado perilinfa que está localizado en el espacio perilinfático.[2]

Existen también los canales semicirculares ,son tres tubitos arqueados en semicírculos, implantados en el vestíbulo y situados en tres planos rectangulares, según las tres dimensiones del espacio. Los canales semicirculares nos dan la noción del espacio y, por lo tanto, contribuyen al mantenimiento del equilibrio de la cabeza y del cuerpo.

Después encontramos el caracol o cóclea es un sistema de tubos enrollados, con tres tubos diferentes, uno al lado del otro denominados rampa vestibular, rampa

media y rampa timpánica. La rampa vestibular y media están separadas entre sí por la membrana vestibular (M.V.), la rampa timpánica y la rampa media están separadas por la membrana basilar (M.B.). En la superficie de la membrana basilar se halla una estructura, el órgano de Corti, que contiene una serie de células mecánicamente sensibles, las células ciliadas. La rampa vestibular y la rampa timpánica se encuentran llenas de perilinfa, ésta es rica en Na y pobre en proteínas. La rampa media contiene endolinfa la cual es rica en proteínas y contiene sobre todo K. La rampa vestibular se relaciona con la ventana oval mediante el vestíbulo y la rampa timpánica limita con la ventana redonda. Ambos conductos comunican abiertamente en el vértice del caracol o helicotrema. Las células ciliadas sostenidas por las células de Deiters están dispuestas angularmente y con sus extremos alcanzan la membrana tectoria de tipo gelatinoso y que está extendida sobre las células ciliadas.

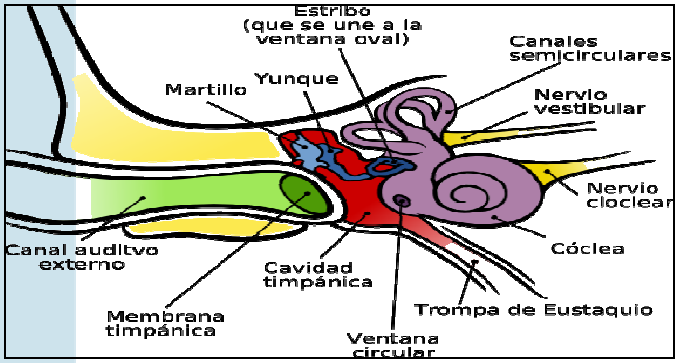

Figura 2. Anatomía del Oído Humano.

Lección 4: Enfermedades, Lesiones y cuidados del sistema Auditivo.

Enfermedades y Lesiones.

Las enfermedades del oído externo, medio o interno pueden producir una sordera total o parcial; además, la mayor parte de las enfermedades del oído interno están asociadas a problemas con el equilibrio.

Entre las enfermedades del oído externo se encuentran las malformaciones congénitas o adquiridas; la inflamación producida por quemaduras, por congelación o por alteraciones cutáneas, y la presencia de cuerpos extraños en el canal auditivo externo. Entre las enfermedades del oído medio se encuentran la perforación del tímpano y las infecciones. En el oído interno pueden producirse alteraciones tales como las producidas por trastornos congénitos y funcionales, por drogas y por otras sustancias tóxicas, problemas circulatorios, heridas y trastornos emocionales. La otalgia, o dolor de oídos, no siempre está relacionada con alguna enfermedad del oído; a veces la causa se encuentra en un diente incrustado, sinusitis, amigdalitis, lesiones nasofaríngeas o adenopatías cervicales. El tratamiento depende de cuál sea la causa principal. El acufeno es un zumbido persistente que se percibe en los oídos y puede producirse como consecuencia de alguna de las alteraciones anteriores; otras causas pueden ser la excesiva cantidad de cera en el oído, alergias o tumores. Con frecuencia, el acúfeno persistente se debe a la exposición prolongada a un ruido excesivo que daña las células pilosas de la cóclea. A veces las personas que padecen esta alteración pueden utilizar un enmascarador de sonido para paliar el problema.

Enfermedades del oído externo.

Entre las malformaciones congénitas del oído externo destaca la ausencia del pabellón auditivo, e incluso la apertura del canal auditivo externo. Si las estructuras del oído medio son anormales es posible realizar una cirugía reconstructora de la cadena de huesecillos para restablecer parte de la capacidad auditiva. Entre las malformaciones adquiridas del oído externo se encuentran los

cortes y las heridas. El otematoma, conocido como oído en forma de coliflor y típico de los boxeadores, es el resultado frecuente de los daños que sufre el cartílago del oído cuando va acompañado de hemorragia interna y una producción excesiva de tejido cicatrizante.

La inflamación del oído externo puede aparecer como consecuencia de cualquier enfermedad que produzca a su vez inflamación de la piel; es el caso de las dermatitis producidas por quemaduras, lesiones y congelaciones. Enfermedades cutáneas como la erisipela o la dermatitis seborreica afectan al oído con mucha frecuencia. Tuberculosis y sífilis cutánea son algunas de las enfermedades más raras que también afectan al oído externo.

La presencia de cuerpos extraños en el canal auditivo externo (insectos, algodón y cerumen —la cera que segrega el oído—) produce alteraciones auditivas y deben ser extraídos con mucho cuidado.

Enfermedades del oído medio.

La perforación del tímpano puede ocurrir por una lesión producida por cualquier objeto afilado, por sonarse la nariz con fuerza, al recibir un golpe en el oído, o a causa de cambios súbitos en la presión atmosférica.

La infección (véase Microbiología y enfermedad) del oído medio, aguda o crónica, se denomina otitis media. En la otitis media supurativa aguda se incluyen todas las infecciones agudas del oído medio producidas por bacterias piógenas. Por lo general, estas bacterias llegan al oído medio a través de la trompa de Eustaquio. Cuando el mastoides resulta afectado, la otitis media se puede complicar y, con frecuencia, se produce sordera debido a la formación de adherencias y granulaciones de tejidos que impiden el movimiento del tímpano y de los huesecillos. Si se produce una distensión dolorosa del tímpano puede ser necesario realizar una intervención quirúrgica para permitir el drenaje del oído medio. Desde que se comenzaron a utilizar de forma generalizada la penicilina y otros antibióticos, las complicaciones que afectan al mastoides son mucho menos

frecuentes. La otitis media supurativa crónica puede producirse como consecuencia de un drenaje inadecuado del pus durante una infección aguda. Esta patología no responde con facilidad a los agentes antibacterianos debido a que se producen cambios patológicos irreversibles.

Las otitis medias no supurativas, o serosas, agudas y crónicas, se producen por la oclusión de la trompa de Eustaquio a causa de un enfriamiento de cabeza, amigdalitis o adenoiditis, sinusitis, o por viajar en un avión no presurizado. La forma crónica también puede producirse como consecuencia de infecciones bacterianas producidas por neumococos o por Haemophilus influenzae. Debido a que la descarga serosa (acuosa) empeora la capacidad auditiva, se ha sugerido la posibilidad de que los niños que padezcan otitis media puedan encontrar dificultades para el desarrollo del lenguaje. Se han utilizado diversos tratamientos, entre ellos el uso de antibióticos y antihistamínicos, la extirpación de amígdalas y adenoides, y la inserción de tubos de drenaje en el oído medio.

Uno de cada mil individuos adultos padece una pérdida de su capacidad auditiva debido a una otosclerosis, u otospongiosis, que consiste en la formación de hueso esponjoso entre el estribo y la ventana oval. Como consecuencia de esta formación de tejido, el estribo queda inmovilizado y ya no puede transmitir información hacia el oído interno. Cuando esta alteración progresa, es necesario eliminar los depósitos óseos mediante cirugía, y reconstruir la conexión entre el estribo y la ventana oval. En ocasiones, el estribo se reemplaza por una prótesis similar a un émbolo. Incluso tras haber efectuado una operación quirúrgica con éxito puede continuar depositándose tejido óseo y producirse la pérdida de capacidad auditiva años después.

Enfermedades del oído interno

Las enfermedades del oído interno también pueden alterar el sentido del equilibrio e inducir síntomas de mareo. Estos síntomas también pueden deberse a anemia, hipertermia, tumores del nervio acústico, exposición a un calor anormal, problemas circulatorios, lesiones cerebrales, intoxicaciones y alteraciones emocionales. El

vértigo de Ménière aparece como consecuencia de lesiones producidas en los canales semicirculares y produce náuseas, pérdida de la capacidad auditiva, acúfenos o ruido en los oídos y alteraciones del equilibrio. A veces está indicada la destrucción del laberinto pseudomembranoso mediante criocirugía o por irradiación con ultrasonidos para combatir vértigos que no tienen tratamiento.

La destrucción traumática del órgano de Corti en el oído interno es la responsable de una gran proporción de los casos de sordera total. En los últimos años, los científicos han desarrollado un dispositivo electrónico destinado a adultos que padecen sordera profunda, que se conoce como implante coclear. Este aparato convierte las ondas sonoras en señales eléctricas que se liberan en unos electrodos implantados en la cóclea, y de esta manera se produce la estimulación directa del nervio auditivo. Sin embargo, los sonidos que produce son poco definidos y hasta ahora el implante coclear se utiliza sobre todo como una ayuda para poder leer en los labios.

Cuidados.

La mayor parte de las enfermedades del oído que implican procesos infecciosos, inflamatorios o alérgicos, son tratadas por médicos conocidos como otorrinolaringólogos o especialistas en laringe, nariz y oídos (ORL). Los cirujanos otorrinolaringológicos tratan problemas tales como la otosclerosis, el trauma físico y el drenaje de los tejidos infectados que requieren operaciones quirúrgicas.

CAPITULO 2: CONCEPTOS BASICOS DEL SONIDO

Lección 5: Conceptos Básicos Del Sonido.

En este capítulo abordaremos los conceptos básicos del sonido físico como tal, y generaremos los conceptos necesarios para empezar un criterio acústico integral. Empezaremos a comprender el sonido y sus propiedades básicas para poder utilizarlos posteriormente en el dominio acústico. Es muy importante que cada concepto quede muy claro, pues cada concepto principal dependerá para comprender conceptos posteriores, y para aplicar soluciones sonoras en la acústica cotidiana a la que se refiere nuestro campo de acción. La física y matemática que necesitaremos es muy elemental, sencilla de manejar y explicar. Abordaremos el sonido y la acústica mas desde conceptos claros y aplicativos, que de demostraciones científicas y matemáticas.

Este capítulo es la base de toda la estructura que necesitaremos para nuestro curso de acústica y fundamentos del sonido y si entendemos muy bien los conceptos de este curso entenderemos mucho mejor y más fácil los demás conceptos que abarcaremos en la Tecnología en Audio.

Alejandro Bidondo un Reconocido ingeniero de sonido argentino dijo una vez *"El que entiende el sonido y la acústica entenderá mucho más fácil el audio y los sistemas sonoros eléctricos y electrónicos, puesto que el audio y los sistemas sonoros eléctricos y electrónicos, son en ultimo una equivalencia de todo lo que pasa acústicamente, y van enfocados a recrear muy aproximadamente como el oído del ser humano percibe la música y el mundo que lo rodea".*

Lección 6: Que es el sonido.

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Para comprender mejor este concepto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire, con un pistón en un extremo. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnicamente, en equilibrio (Grafico 1). Este equilibrio es dinámico, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo. En otras palabras, en cada centímetro cúbico (cm3) de aire, ya sea cerca del pistón o lejos de él, hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas (una cantidad muy grande: unos 25 trillones).

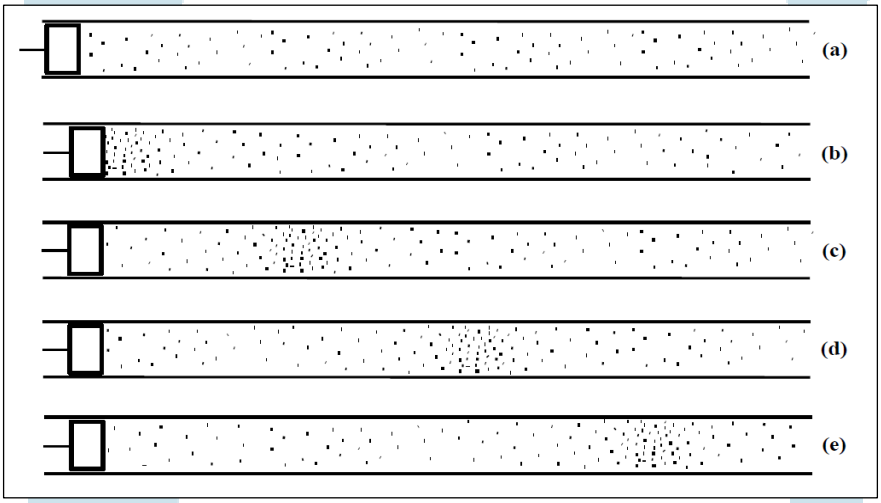

Grafico 1. Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Supongamos ahora que se desplaza rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (Grafico 1.b). Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas por éste, mientras que las que se encuentran muy alejadas no. Esto

implica que en la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir que la misma cantidad de aire ahora ocupa menos espacio. En otras palabras, habrá ahora más moléculas por centímetro cúbico cerca del pistón que lejos de él. Al igual que lo que sucede cuando se abre la válvula de un neumático, el aire comprimido tiende a descomprimirse, desplazándose hacia la derecha, y comprimiendo a su vez el aire que se encuentra próximo a él (Grafico 1.c). Esta nueva compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse, que se efectiviza a costa de comprimir el aire contiguo (Grafico 1.d). El proceso se repite así en forma permanente, con lo cual la perturbación original (la compresión del aire cercano al pistón) se propaga a lo largo del tubo alejándose de la fuente de la perturbación (el pistón).

Este proceso se denomina también propagación de una onda sonora, y es similar a lo que sucede cuando en una pileta en calma se deja caer una piedra. En el instante en que la piedra golpea el agua, se produce una perturbación, que se propaga en forma de una circunferencia cuyo radio va en aumento, como se aprecia en la Grafico 2.

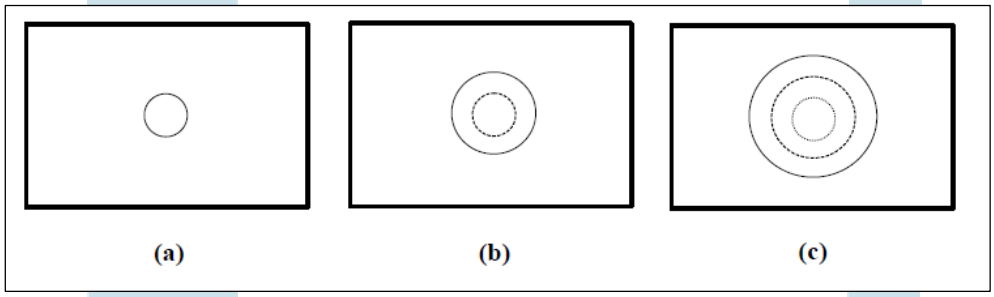

Grafico.2. Una perturbación de la superficie del agua en una pileta inicialmente en calma se propaga como una circunferencia de radio cada vez mayor.

Al aire libre, es decir sin la restricción de un tubo (y en ausencia de superficies que reflejen el sonido), la perturbación se propaga, similarmente, en forma de una onda esférica cuyo radio va aumentando a medida que transcurre el tiempo.

El fenómeno sonoro que analizamos anteriormente (Grafico 1) consistía en una Única perturbación del aire. La mayor parte de los sonidos de la naturaleza son, en realidad, el resultado no de una sino de múltiples perturbaciones sucesivas. Estos sonidos se denominan periódicos, y pueden dividirse en ciclos, donde cada ciclo abarca todo lo que sucede entre dos perturbaciones sucesivas del aire.

Siguiendo con la analogía de la piedra que cae en la pileta, podemos pensar en una sucesión de gotas que caen sobre la superficie del agua, lo cual dará lugar a una serie de círculos concéntricos que van agrandándose a medida que van surgiendo nuevos círculos. Análogamente, al aire libre, y lejos de toda superficie capaz de reflejar el sonido, las sucesivas perturbaciones se propagarán como esferas concéntricas crecientes que se alejan de la fuente. En presencia de superficies reflectoras, la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja.

Muchas veces se habla de campo sonoro para referirse a la forma en que se distribuye el sonido en los diversos puntos de un determinado espacio, por ejemplo dentro de una sala o al aire libre.

Lección 7: Representación Grafica del Sonido.

Hasta ahora no habíamos tenido en cuenta la manera en que se aplican las perturbaciones sucesivas. Así, podría ocurrir que éstas fueran el resultado de un suave vaivén del pistón, o que por el contrario cada perturbación consistiera en una brusca sacudida del mismo. La realidad es que aún manteniéndose la frecuencia, ambos sonidos sonarán muy diferentes, lo cual muestra la importancia de conocer la forma de la perturbación. Para ello se utiliza un tipo de representación gráfica denominada oscilograma, que consiste en mostrar la evolución en el tiempo de la perturbación (Grafico 3) en un par de ejes correspondientes al tiempo (eje horizontal) y a la presión sonora (eje vertical).

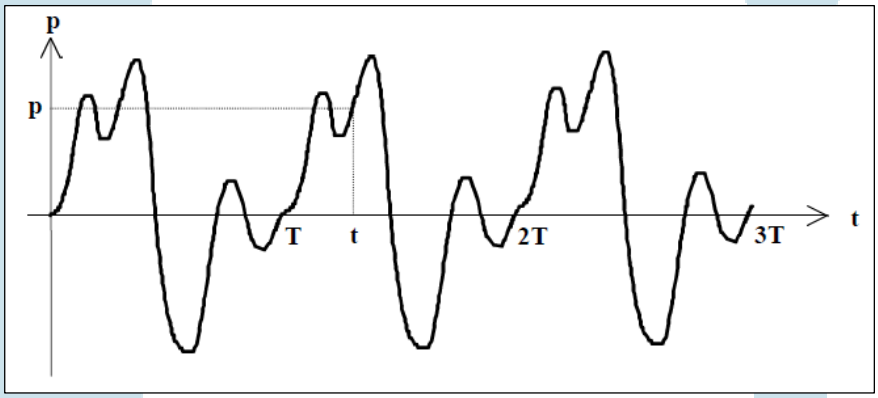

Grafico 3. El oscilograma de un sonido, en el cual pueden apreciarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y en el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

El significado de este gráfico es que para cada instante t, representado como un punto o posición en el eje horizontal, corresponde una presión sonora p, representada por una altura medida en la escala del eje vertical. Los valores positivos (arriba del eje t) representan compresiones y los valores negativos (debajo del eje t), descompresiones. Es interesante explorar el significado del

periodo T y de la frecuencia f en un oscilograma. En el Grafico 3 se puede apreciar que T es la duración de cada ciclo o porción repetitiva de la onda. En el grafico 4, se ha dibujado la onda durante un tiempo de 1s (en otra escala). Dado que hay 12 ciclos en dicho tiempo, la frecuencia es de 12 Hz.

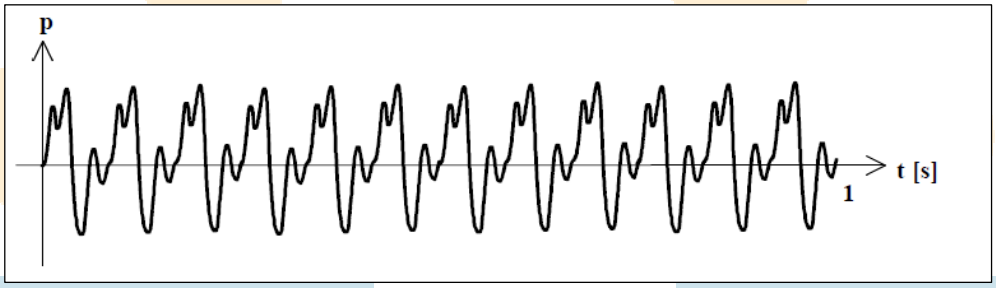

Grafico 4. Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir 1 s, se cuentan 12 ciclos, por lo cual la frecuencia es de 12 Hz.

Lección 8: Amplitud, Periodo y Frecuencia.

Amplitud.

El oscilograma nos permite interpretar fácilmente un parámetro del sonido vinculado a la fuerza o intensidad del mismo: la amplitud. La amplitud se define como el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo. La amplitud se denomina también valor de pico o valor pico. En el Grafico 5, vemos la misma forma de onda con dos amplitudes diferentes.

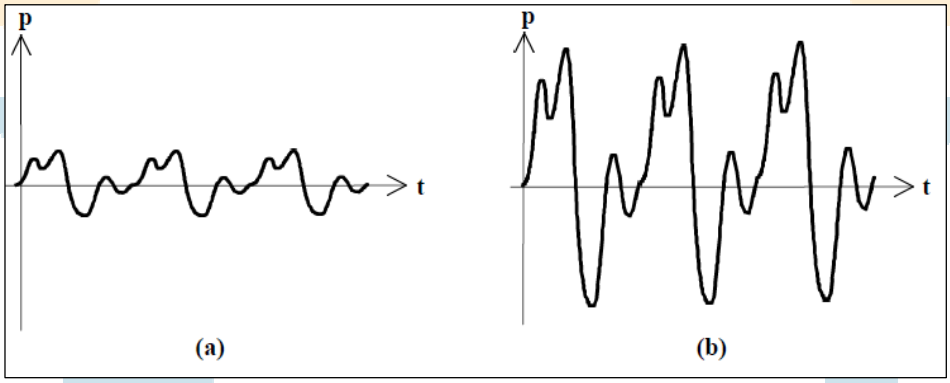

Grafico 5. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente amplitud. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud.

Periodo.

Un segundo parámetro es el periodo, T, que se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos (s) o milisegundos (ms), es decir la milésima parte de un segundo. El periodo de los sonidos audibles para el ser humano varía entre los 0,05 ms (sonidos muy agudos) y los 50 ms (sonidos muy graves). Cabe destacar que son tiempos muy cortos que impiden en general que los ciclos puedan percibirse como fenómenos separados. El cerebro tiende a integrarlos en una única sensación, la sensación sonora.

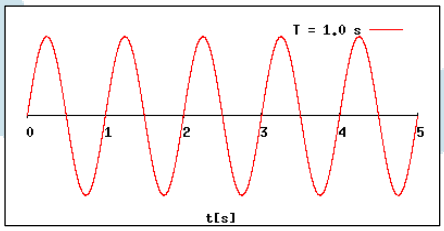

Grafico 6. Representación grafica de una onda con periodo en 1 Segundo.

Como se puede observar en el Grafico 6 tenemos una onda con periodo en 1 segundo, quiere decir que en un segundo es el tiempo que tarda la onda en hacer un ciclo completo.

Frecuencia (f).

El tercer parámetro, uno de los más fundamentales en Acústica, es la frecuencia, f. Se define como la cantidad de ciclos por segundo, o lo que es lo mismo, la cantidad de perturbaciones por segundo. Se expresa en hertz (Hz), unidad llamada así en honor a Heinrich Hertz, científico del siglo XIX que descubrió las ondas de radio. Esta unidad es equivalente al ciclo por segundo (cps), aunque la unidad Hz se encuentra más frecuentemente en los textos y en las especificaciones técnicas de los diversos equipos. La frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre los 20 Hz (sonidos graves) y los 20.000 Hz (sonidos agudos) ó 20 kHz (kilohertz, es decir 1.000 Hz). Existen algunas relaciones matemáticas importantes entre estos parámetros. Así, el periodo T y la frecuencia f están relacionados por las ecuaciones.

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f}}$$

En las cuales si T se expresa en s, entonces f se expresa en Hz, y si T se expresa en ms,f se expresa en kHz. Por ejemplo, si sabemos que el periodo de cierto sonido es de 0,01 s, es decir 1/100 s, entonces la frecuencia será, aplicando la primera relación, 100 Hz. Si, en cambio conocemos que la frecuencia es de 1.000 Hz, aplicando la segunda relación se llega a que el periodo es de 0,001 s, es decir 1 ms.

Lección 9: Envolvente y Formas de onda.

Envolvente

La amplitud de un sonido no es necesariamente constante, sino que puede variar en el tiempo. De hecho, la mayor parte de los sonidos reales tienen amplitud variable. Se define la envolvente de un sonido como la forma que se obtiene uniendo las amplitudes de los ciclos sucesivos. En la Figura 1.7 se puede apreciar una onda cuya amplitud varía en el tiempo. En línea de trazos se muestra la envolvente respectiva.

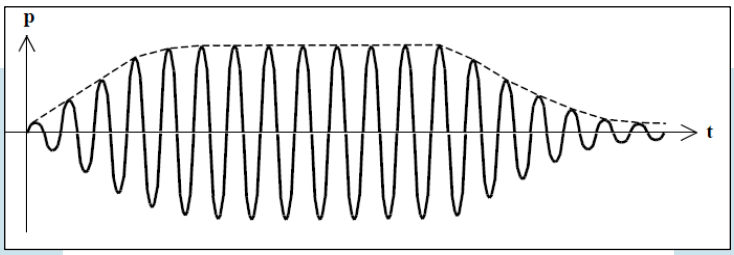

Grafico 7. Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la envolvente, curva que une los picos de cada ciclo.

Formas de Onda

Podemos afirmar que virtualmente cada sonido implica una forma de onda diferente. Existen sin embargo algunas formas de onda que reciben especial atención, ya sea por su simplicidad o por su utilidad práctica o teórica. La primera de ellas es la onda cuadrada, que consiste en dos niveles (generalmente uno positivo y el otro negativo) que se van alternando en el tiempo. Cada uno de ellos permanece un tiempo T/2, donde T es el periodo. En el grafico 7 se muestra un ejemplo. Esta onda es importante por su simplicidad geométrica. No existe en la Naturaleza, pero es muy fácil de sintetizar electrónicamente.

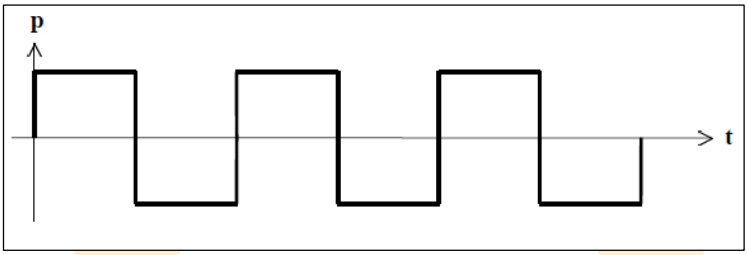

Grafico 8. Tres ciclos de una onda cuadrada.

Una variante de la onda cuadrada es el tren de pulsos, en el cual el tiempo de permanencia en cada uno de los dos niveles no es el mismo. Se suele especificar un porcentaje que corresponde a la proporción del periodo en el nivel alto. En el grafico 8. Se muestra un tren de pulsos al 25%.

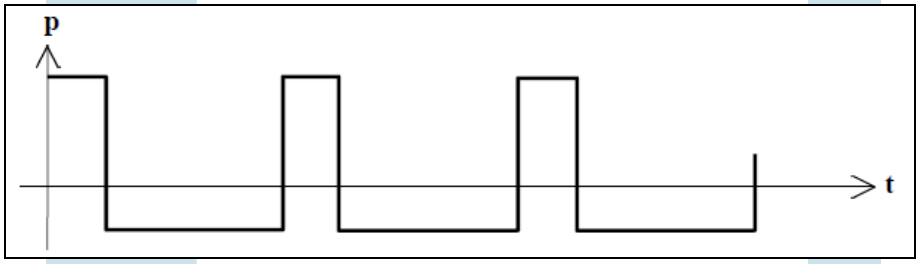

Grafico 9. Tres ciclos de un tren de pulsos al 25%.

Otra forma de onda interesante es la onda triangular (Grafico 9). Está formada por rampas que suben y bajan alternadamente.

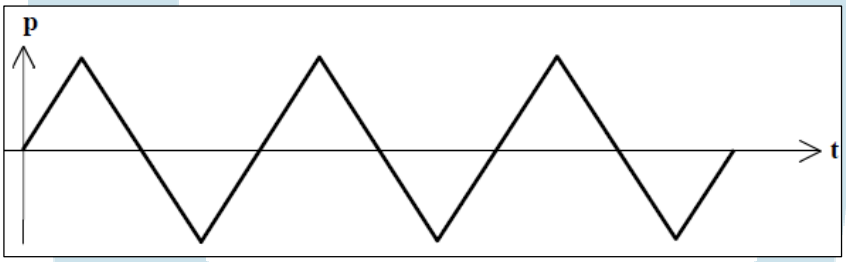

Grafico 10. Tres ciclos de una onda triangular.

La onda diente de sierra (Grafico 10) tiene una subida rápida y una bajada en forma de rampa o viceversa. Si bien tampoco es una forma de onda natural, la forma de onda del sonido del violín guarda cierta similitud con la diente de sierra.

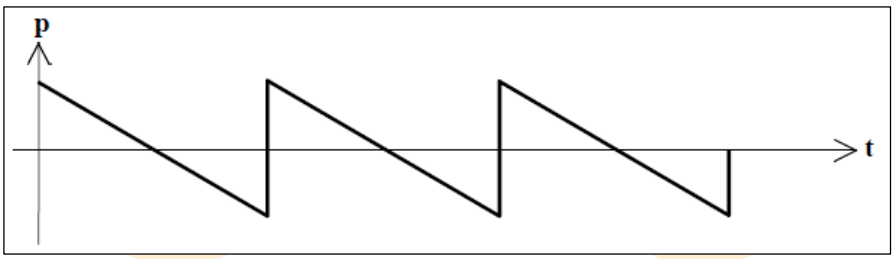

Grafico 11. Tres ciclos de una onda diente de sierra.

Esta forma de onda los sonidos que se generan al rozar dos objetos, por ejemplo el chirrido cuando se frota rápidamente una tiza en una pizarra.

Onda Senoidal

Finalmente, tenemos la onda más importante, no sólo en Acústica sino en toda la Física y gran parte de la Matemática: la onda senoidal (Grafico 12), también denominada senoide o sinusoide. Si bien matemáticamente tiene cierta complicación (está representada por la función trigonométrica seno), físicamente esta forma de onda corresponde a las oscilaciones más sencillas posibles. Pocos sistemas son tan simples como para oscilar senoidalmente. El más conocido es el péndulo: la oscilación de un peso suspendido de un hilo sigue una ley senoidal. En el campo de la música, el diapasón de horquilla (no confundir con el corista o afinador de banda) produce un sonido casi puramente senoidal. El silbido es también casi senoidal, y lo mismo ocurre con una flauta ejecutada piano (suave). Una cuerda de guitarra punteada muy suavemente en su punto medio también produce un sonido aproximadamente senoidal.

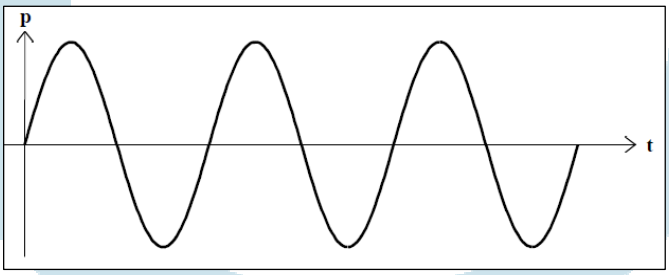

Grafico 12. Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

Pero lo que da mayor importancia todavía a esta forma de onda es el hecho de que cualquier onda periódica puede considerarse como una superposición (suma) de ondas senoidales de distintas frecuencias, todas ellas múltiplos de la frecuencia de la onda (propiedad conocida como Teorema de Fourier). Dichas ondas se llaman armónicos. Esta superposición no se limita a ser un artificio de análisis del sonido, sino que si se escucha atentamente es perfectamente audible en muchos casos. La onda senoidal es la más simple precisamente porque consta de una sola frecuencia.

Lección 10: Longitud de Onda y Velocidad del Sonido.

Longitud de Onda.

Vamos ahora a definir algunos parámetros muy importantes relacionados con los sonidos periódicos. El primero es la longitud de onda, que se representa con la letra griega lambda, ʎ, y es la distancia entre dos perturbaciones sucesivas en el espacio (Grafico 13). Se mide en metros (m) o en centímetros (cm), y para los sonidos audibles está comprendida entre los 2 cm (sonidos muy agudos) y los 17 m (sonidos muy graves). La longitud de onda es importante en varias situaciones. En primer lugar, un objeto grande comparado con la longitud de onda es capaz de alterar significativamente la propagación del sonido cuando se interpone entre la fuente sonora y el oyente. Así, por ejemplo, los sonidos graves pueden "doblar la esquina" fácilmente porque su longitud de onda es grande. Los agudos, en cambio, cuya longitud de onda ʎ puede ser de apenas algunos cm, se ven considerablemente atenuados.

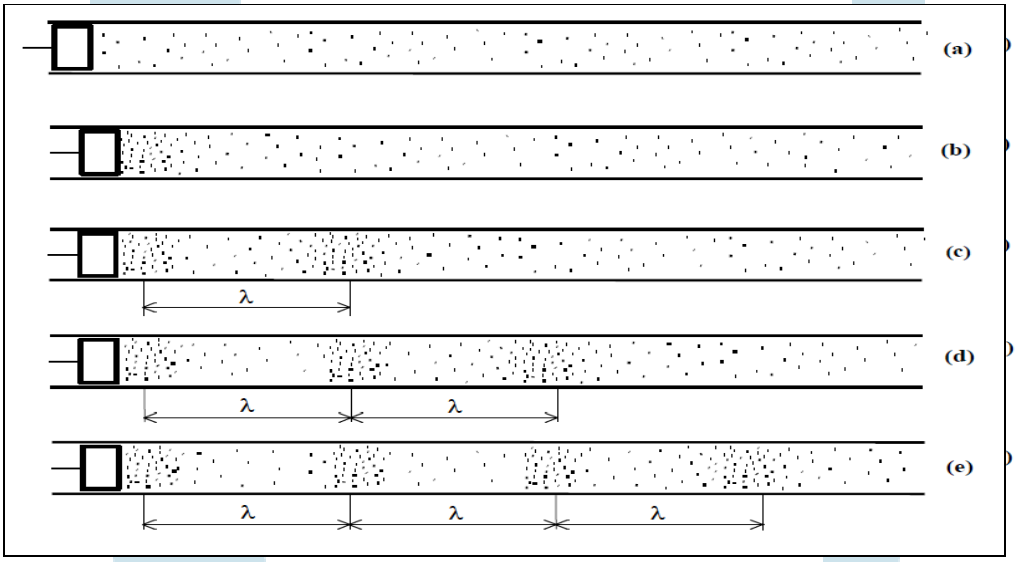

Grafico 13. Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, periódica. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia ʎ (longitud de onda). (d) Tercera perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia 2ʎy la

segunda una distancia ʎ. (e) Cuarta perturbación, cuando las anteriores han recorrido las distancias 3ʎ, 2ʎ, y ʎ respectivamente.

Otra situación en la cual la longitud de onda juega un papel importante es en la eficiencia de los altavoces. Cuando la longitud de onda l emitida por un parlante es mucho más pequeña que su propio tamaño, la potencia emitida se reduce considerablemente. Por esa razón, los tweeters (altavoces de agudos) son mucho más pequeños que los woofers (altavoces de graves). Por último, veremos más adelante que la respuesta de los micrófonos se altera para aquellos sonidos de longitud de onda l comparable con el tamaño del micrófono.

Velocidad del Sonido.

Ahora nos preguntamos qué tan rápido se aleja la onda de la fuente. La respuesta es que el sonido se propaga con una velocidad c que en el aire a 23 ºC vale o bien

$$c = 345 \text{ m/s.}$$

$$c = 1242 \text{ km/h.}$$

Esta velocidad varía algo con la temperatura (un 0,17 %/ºC), por eso en diversos textos pueden encontrarse valores ligeramente diferentes. Una observación importante es que la velocidad del sonido es independiente de la intensidad de la perturbación.

Veamos algunos ejemplos. Si una persona se encuentra a 100 m de distancia de otra (aproximadamente una cuadra), un grito de la primera demorará, a causa de esta velocidad, 29 centésimas de segundo en llegar a donde se encuentra la segunda. Otro ejemplo es el de los relámpagos y los truenos. Un relámpago es una enorme chispa que se produce por una descarga eléctrica entre distintas capas de aire con cargas opuestas. Esta chispa produce a la vez luz y sonido. Sin embargo, la luz viaja a una velocidad mucho más alta, y alcanza nuestra vista casi instantáneamente, mientras que el sonido demora un tiempo apreciable en llegar a

nosotros. Así, si cronómetro en mano comprobamos que el trueno se escucha 5 s después de ver un relámpago, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular que el relámpago se produjo a una distancia

d = 345 m/s ´ 5 s = 1725 m = 1,725 km.

Otro ejemplo interesante es el eco. Si gritamos frente a una superficie vertical un tanto alejada (por ejemplo una barranca o un acantilado), el sonido tardará un tiempo en llegar a la superficie, se reflejará en ella, y volverá demorando otro tiempo adicional. El resultado será que se escucha, unos instantes después, que la pared "repite" el grito. Más adelante veremos ejemplos correspondientes a los sistemas de sonido, en los cuales a causa de la distancia entre los parlantes y el público se producen retardos que es preciso corregir.

Existe una relación entre la velocidad del sonido, la longitud de onda y la frecuencia y está dada por la siguiente ecuación.

$$\lambda = c / f$$

La longitud de onda es una relación entre la velocidad del sonido y la frecuencia.

Lección 11: Espectro y bandas de octava.

Espectro.

Vimos que cualquier sonido periódico puede representarse como la suma de una serie de armónicos, es decir de sonidos senoidales cuyas frecuencias son f, 2f, 3f, 4f, 5f, etc. Por ejemplo, el LA central del piano, cuya frecuencia es de 440 Hz, contiene armónicos de frecuencias 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, 2200 Hz, etc. Cada uno de estos armónicos puede tener su propia amplitud. En el grafico 14a. Se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y en el grafico 14b. Se ha obtenido su suma, que según se aprecia se va aproximando a la onda cuadrada.

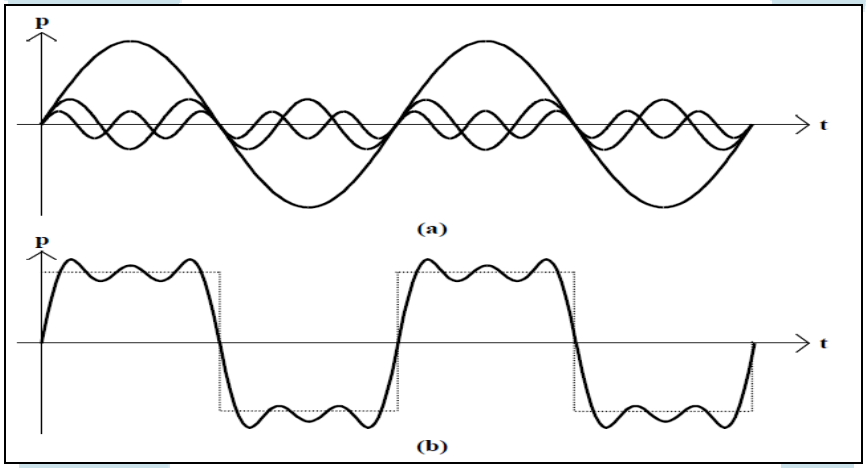

Grafico 14. (a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia fo, cuyas frecuencias son fo, 3fo y 5fo. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

La información sobre las frecuencias que contiene un determinado sonido y sus respectivas amplitudes constituyen lo que se denomina el espectro del sonido. El espectro se puede especificar en forma de tabla, o se puede representar

gráficamente mediante un espectrograma, que es un gráfico con dos ejes: el horizontal, graduado en frecuencia, y el vertical, en amplitud.

ARMÓNICO Nº	CUADRADA	TRIANGULAR	DIENTE DE SIERRA
1	1,27	0,81	0,64
2	0	0	0,32
3	0,42	0,09	0,21
4	0	0	0,16
5	0,25	0,032	0,13
6	0	0	0,11
7	0,18	0,017	0,091

Tabla 1. Amplitud de los primeros 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

En la Tabla 1, se indican los primeros armónicos para las ondas cuadradas, triangular y diente de sierra, suponiendo que la amplitud es, en los tres casos, 1. En la Figura 15, se ha representado el espectrograma para una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz, incluyendo hasta el armónico 7.

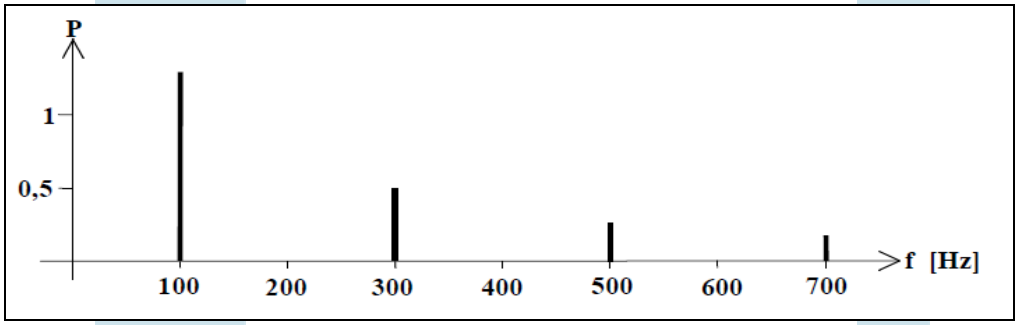

Grafico 15.Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz. Esta onda tiene únicamente armónicos impares.

Espectros continuos.

Existe aún otro tipo de sonidos, formados por una cantidad muy grande de parciales muy próximos entre sí, que se denominan genéricamente ruido. Algunos ejemplos de esto son el sonido del mar, el ruido de fondo de un cassette y el sonido que se emite al pronunciar las consonantes f, j, s, z o simplemente al

soplar. Debido a la gran cantidad de parciales, y al hecho de que cada uno es de amplitud muy pequeña, lo más conveniente es representar el espectro no mediante líneas espectrales individuales, sino como una curva continua (Grafico 15) denominada densidad espectral, p2.

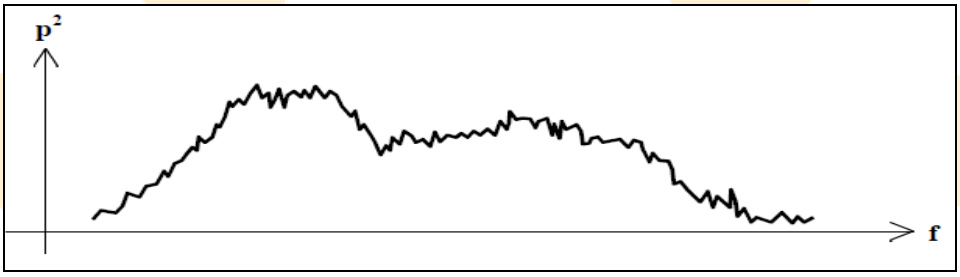

Grafico 16. Ejemplo de espectro continúo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la densidad espectral, que representa la energía en función de la frecuencia.

Bandas de Octava.

Hay muchas situaciones donde se requiere de un análisis de frecuencia, pero donde el análisis de banda angosta no presenta los datos en su forma más útil. Un ejemplo de esto es el análisis del ruido acústico donde se estudia el índice de molestias a un observador humano. El mecanismo de audición humano es sensible a proporciones de frecuencias más que a frecuencias. La frecuencia de un sonido determinará su altura como percibido por un auditor y una proporción de dos veces una frecuencia se escucha como un cambio de altura de una octava, sin que importe cuales fueran las frecuencias. Si por ejemplo se sube un sonido de 100 Hz a 200 Hz, su altura se subirá una octava: Un sonido de 1000 Hz cuando se sube a 2000 Hz también se subirá una octava en altura. El hecho es válido con tanta precisión en un rango importante de frecuencias, que es conveniente definir una octava como una proporción de frecuencias de dos, aunque la octava misma es una medida subjetiva de cambio en la altura de un sonido.

Este fenómeno se puede resumir diciendo que la percepción de altura del oído es proporcional al logaritmo de la frecuencia, en lugar de a la frecuencia misma. Por

eso, tiene sentido el expresar el eje de frecuencias de espectros acústicos en un eje de log frecuencias, y eso es lo que se hace de manera casi universal. Por ejemplo, las curvas de las respuestas de frecuencias publicadas por los fabricantes de sonido, siempre vienen en log frecuencia. De la misma manera, cuando se lleva a cabo un análisis de frecuencia de sonido, es muy común el usar gráficas con log frecuencia.

La octava es un intervalo de frecuencias para el oído, que el llamado análisis de banda de octavas ha sido definido como una norma para el análisis acústico. El dibujo de abajo muestra un espectro típico, de banda de octava, donde se usan las frecuencias estándar ISO de la banda de las octavas. Cada banda de octavas tiene una anchura de banda de alrededor del 70% de su frecuencia central. Este tipo de espectro se llama banda a porcentaje constante, porque cada banda tiene su anchura que es un porcentaje constante de su frecuencia central. En otras palabras: las bandas de análisis se hacen más anchas en proporción a sus frecuencias centrales.

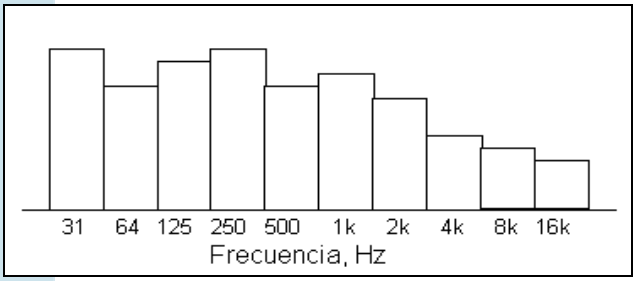

Grafico 17. Espectro sonoro promediado en bandas de octava.

Se podría argumentar que la resolución de frecuencias en un análisis de banda de octavas no es lo suficiente preciso, para ser muy útil, especialmente en el análisis de la firma de vibraciones. De maquinaria, pero es posible de definir el análisis de bandas a porcentaje constante, con bandas de frecuencias de una anchura más angosta. Un ejemplo común de esto es el espectro de un tercio de octava, cuyas anchuras de banda son alrededor del 27% de sus frecuencias centrales. Tres bandas de un tercio de octava forman una octava y la resolución de este tipo de espectro es tres veces mejor que la del espectro de la banda de octava. Los

espectros de un tercio de octava se usan frecuentemente en mediciones acústicas.

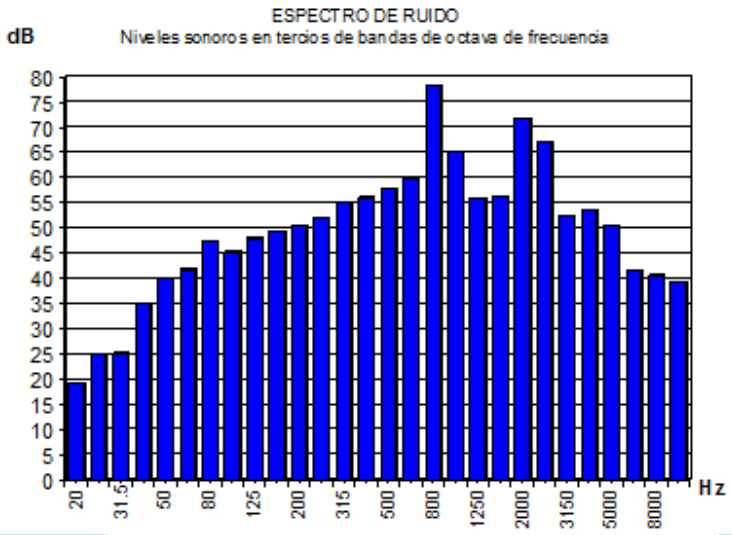

Grafico 18. Espectro sonoro promediado en bandas de tercio de octava.

CAPITULO 3: DECIBELES

Lección 12: Generalidades de los Decibeles.

Historia del decibel.

El bel (símbolo B) es una unidad de medida de razones. Él es principalmente usado en las telecomunicaciones, electrónica, y acústica. Fue inventado por ingenieros del Bell Labs para cuantificar la reducción en el nivel acústico sobre un cabo telefónico patrón con 1 milla de largura. Originalmente era llamado de unidad de transmisión o TÚ, pero fue renombrado entre 1923 y 1924 en homenaje al fundador del laboratorio, Alexander Graham Bell.

Decibel en la medida física del sonido.

El sonido es una oscilación en la presión del aire (o de otro medio elástico) capaz de ser percibida por el oído humano. El número de oscilaciones de la presión del aire por unidad de tiempo definen su frecuencia, mientras la magnitud de la presión media define la potencia y la intensidad sonora. La frecuencia es expresa en hertz (o ciclos/segundo), y la presión, en pascal (o newtons /m2), mientras la potencia es la energía emitida por la fuente sonora por unidad de tiempo, expresa en joules/s o W (estamos usando unidades del Sistema Internacional). La intensidad sonora puede ser definida como potencia por unidad de área, expresa en watts/m2. Esas escalas para medida de presión, potencia e intensidad de las ondas sonoras son escalas lineales.

Pero, la presión, la potencia y la intensidad de los sonidos captados por el oído humano cubren un amplio rango de variación.Por ejemplo, un murmúrio irradia una potencia de 0.000 000 001 watt, mientras el grito de una persona común tiene una potencia sonora de cerca de 0.001 watt; una orquesta sinfônica llega a producir 10 watts, mientras un avión la jato emite 100 000 watts de potencia al despegar. Siendo así, una escala logarítmica, como el *decibel*, es más adecuada para medida de esas grandezas físicas.

Lección 13: El Decibel.

El decibel, comúnmente abreviado como dB, es de uso frecuente en el mundo de la acústica. Los niveles expresados en decibeles facilitan el manejo del extenso rango de sensibilidad que caracterizan al oído y el cual es capaz de percibir, las relaciones de estímulos se acercan más a la percepción humana, que las diferencias de estímulos. Relaciones entre potencias, intensidades, presión sonora, voltaje o corriente son adimensionales, es decir un número. La tabla 2 muestra tres formas diferentes de expresar un mismo número. Las más conocidas son la decimal y la aritmética.

Forma decimal	Forma aritmética	Forma exponencial
100.000	10x10x10x10x10	10^5
100	10x10	10^2
10	10x1	10^1
1	10/10	10^0
0.1	1/10	10^{-1}
0.01	1/(10x10)	10^{-2}

Tabla 2. Comparación de números expresados en formas decimal, aritmética y exponencial**.**

La más útil para nosotros es la exponencial. Es más fácil escribir 10-12 watt para expresar una millonésima de una millonésima de watt que escribir 0.000000000001 Watt, este tipo de escritura "abreviada" se llama notación científica y es muy usada, dado que permite manejar todo tipo de números, desde muy grandes hasta muy pequeños.

Logaritmos.

El logaritmo decimal de un número dado es el número del exponente, al cual debe ser elevado 10 para obtener ese número. Si representamos 100 como 10^2, esto es equivalente a escribir 10x10 = 100. Igualmente 10^3 significará 10x10x10 = 1000.

- ¿Ahora, como se representa 267?

- Aquí es donde intervienen los logaritmos. Podemos decir que el logaritmo de 100 en base 10 es igual a 2 (log 10100 = 2 ó simplemente log 100 = 2 (ya que los logaritmos "comunes" son en base a 10).
- Si log 100 = 2 y log 1000 = 3, el log de 267 forzosamente va a estar entre 2 y 3, ya que 267 está entre 100 y 1000.
- En este caso, la operación 267 log, nos dará el numero 2,4265.
- Esto nos indica que log10 267 = 2.4265 o que 267 = 102.4265
- Los logaritmos reducen la multiplicación a una adición y la división a una resta, por lo que:

$$\log x.y = \log x + \log y$$

$$\log x / y = \log x - \log y$$

$$\log x\, n = n \log x$$

- Los logaritmos constituyen la base del uso de los decibeles, dado que un nivel es el logaritmo de una relación.
- Un nivel en decibeles es 10 veces el log10 de la relación entre dos cantidades de lo mismo.
- Un nivel de potencia W1 puede ser expresado en términos de referencia, a otra potencia W2 de la siguiente manera:

$$L = \log. (W1 / W2) \text{ [Bel]}$$

- Considerando que el decibel es la décima parte del Bel, el nivel en decibeles de una relación de potencia será:

$$L = 10 \log. (W1 / W2) \text{ [Decibel]}$$

- Esta ecuación se aplica a cualquier tipo de relaciones de potencias (eléctrica, acústica, etc.).

Lección 14: Nivel de Presión Sonora NPS o SPL.

Nivel de Presión Sonora.

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños (0,00002 Pa = 20 ´ 10-6 Pa) hasta valores que si bien todavía pequeños, son un millón de veces más grandes que los anteriores (20 Pa). Estas cifras son poco prácticas de manejar, por lo cual se ha introducido otra escala que comprime este rango: la escala de decibeles. Para expresar una presión sonora en decibeles, se define primero una presión de referencia Pref que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se puede escuchar):

$$P_{ref} = 0{,}00002\ \text{Pa} = 20\ \mu\text{Pa}\ .$$

Entonces se define el nivel de presión sonora, NPS (en inglés se utiliza la sigla SPL, sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NPS} = 20\ \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \qquad [\text{dB}]\ ,$$

Donde P es la presión sonora, y log10 el logaritmo en base 10. El resultado está expresado en decibeles, abreviado dB. Así, para un sonido apenas audible, para el cual P = Pref, resulta

$$\text{NPS} = 20\ \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20\ \log_{10} 1 = 0\ \text{dB}$$

Dado que el logaritmo de 1 es 0. Como segundo ejemplo, consideremos un sonido que tiene una amplitud 1000 veces mayor que el anterior. Entonces

$$\text{NPS} = 20\ \log_{10} \frac{1000\ P_{ref}}{P_{ref}} = 20\ \log_{10} 1000 = 60\ \text{dB}\ ,$$

Por ser log10 1000 = 3. Por último, para el sonido más intenso,

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20 \log_{10} 1.000.000 = 120 \text{ dB} .$$

La expresión matemática mediante la cual se calcula el nivel de presión sonora no es en realidad importante desde el punto de vista práctico, ya que el instrumento con el que se mide NPS, es decir el decibelímetro, no está graduado en valores de presión, sino precisamente en dB, por lo cual en la práctica no hace falta calcular el valor de NPS a partir del correspondiente valor de presión.

En la Tabla 3 se indican algunos valores de conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

NPS [dB]	P [Pa]
120	20,0
110	6,3
105	3,6
100	2,0
95	1,1
90	0,63
85	0,36
80	0,20
75	0,11
70	0,063
60	0,020
50	0,0063
40	0,0020
30	0,00063
20	0,00020
10	0,000063
0	0,000020

Tabla 3.Valor de la presión correspondiente a varios niveles de presión sonora.

Lección 15: Suma de Decibeles.

Es comúnmente sabido que la adición de dos fuentes de sonido de igual intensidad resulta en un sonido 3dB superior. Como los decibeles son valores logarítmicos, no pueden combinarse mediante la adición algebraica normal. Por ejemplo: El nivel de sonido de un par de altavoces reproduciendo 40dB cada uno será de 43dB y no de 80dB. Cuando dos o más fuentes sonoras de diferentes intensidades deben ser combinadas, debemos considerar la tabla 4.

CUANDO DOS VALORES EN DB SE DEFINEN POR	SUMAR LOS SIGUIENTES DBS AL VALOR SUPERIOR
0 Ó 1	3
2 A 3	2
4 A 8	1
9 O MAS	0

Tabla 4. Relación para la suma de decibeles.

Por ejemplo:

34dB + 41dB = 42 la diferencia entre los valores es 7dB.

Otro ejemplo:

34dB + 41dB + 43dB + 58dB = 58

34dB + 41dB = 42dB la diferencia entre los valores es 7dB.

43dB + 58dB = 58dB la diferencia entre los valores es 15dB.

42dB + 58dB = 58dB la diferencia entre los valores es 16dB.

Cuando la diferencia entre valores es 9dB o superior no hay incremento en la intensidad de sonido porque el nivel de sonido superior deja atrás el nivel de sonido inferior. Usando diferente orden en la adición pueden obtenerse diferencias de 1dB, lo cual no es significante. Para obtener mayor precisión, los decibeles deben sumarse logarítmicamente.

Esta tabla puede usarse para substracción de valores en decibeles también.

Fuentes Documentales de la Unidad 1

- Acústica y Sistemas de Sonido, Ing. Federico Miyara. 1999.
- Acústica Aplicada: Oído – Logaritmos – dB, Ingeniero Francisco Ruffa, 2006.
- www.soundlogics.com/AUDICION%20HUMANA.html.
- http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~29701428/salud/oido.htm

UNIDAD 2. CONCEPTOS BASICOS DE LA ACUSTICA.

Introducción.

Para poder estudiar y comprender cualquier rama de la acústica, como la acústica arquitectónica o la acústica ambiental; es necesario comprender la física básica del sonido y algunos conceptos de acústica, como los fenómenos acústicos los cuales se involucran en cualquier caso de propagación sonora, en esta unidad estudiaremos y comprenderemos esos conceptos necesarios para poder adentrarnos en los temas de acústica más relevantes para la tecnología de audio.

CAPITULO 4. RUIDO ACUSTICO, RUIDO DE FONDO Y CLASES DE RUIDO.

Lección 16: Generalidades del Ruido.

De forma amplia, podemos definir como ruido cualquier sonido no deseado que puede interferir la recepción de un sonido. El ruido acústico es aquel ruido (entendido como sonido molesto) producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes. La mezcla se produce a diferentes niveles ya que se conjugan tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos que las acompañan.

Clasificación del Ruido.

Se pueden hacer dos clasificaciones diferentes de ruido acústico, las mismas se podrían hacer con cualquier otro ruido:

1. En función de la intensidad en conjunción con el periodo.
2. En función de la frecuencia.

Tipos de Ruidos según la intensidad y el periodo.

- Ruido continuo o constante
- Ruido fluctuante.

- Ruido impulsivo.

Tipos de Ruidos según frecuencia.

Existen fuentes de ruido artificiales o generadores de ruido que emiten ruido blanco o rosa. Estos generadores de ruido son utilizados en acústica para realizar ciertas mediciones como aislamiento acústico, insonorización, reverberación, etc.

Lección 17: Ruido de Fondo.

Cuando nos referimos a mediciones acústicas, o inspecciones en materia de ruido, se considera ruido de fondo cualquier sonido indeseado que se produce de forma simultánea a la realización de una medida acústica, y que puede afectar al resultado de la misma. Imaginemos que estamos evaluando el ruido que produce una discoteca en la casa del vecino. En este caso, esperaremos a que suene la música de la discoteca para efectuar las mediciones. Si mientras el instrumento de medida (sonómetro) está midiendo, suena, por ejemplo, un teléfono, ese sonido es ruido de fondo. En este caso concreto el ruido de fondo es muy evidente, y el único problema que origina es la anulación y repetición de la medida. Pero, ¿que ocurriría si el ruido de fondo fuera más sutil, y por lo tanto más difícil de detectar? ¿O si el ruido de fondo escapara a nuestro control o fuera inevitable? En este caso, ese sonido indeseado sería captado por el micrófono, y el sonómetro lo mediría, por lo que el resultado de la medida podría verse alterado.

Corrección por ruido de fondo.

Para evitar los errores en la medida, en primer lugar debe averiguarse si es posible que el ruido de fondo esté afectando el resultado. Midiendo con la fuente evaluada encendida y apagada notaremos si el ruido producido por esta es importante. Si la diferencia entre ambas mediciones es pequeña (menos de 3 dB), la medida no es fiable. Si la al encender la fuente de ruido la medida varía en más de 10 dB, el ruido de fondo no tiene influencia en la medida. Entre medias, el ruido de fondo está afectando a la medida en cierto grado. Por lo tanto, esta medida debe ser corregida por ruido de fondo. Este proceso, consiste en restar ambas medidas siguiendo una sencilla formula.

$$Ls = 10\log (100.1Ls + n - 100.1Ln)$$

Donde Ls+n corresponde a la medición con la fuente evaluada encendida y Ln corresponde a la evaluación del ruido de fondo.

Medida de ruido de fondo.

En primer lugar debe dejarse claro un concepto básico. Siendo estricto en el uso del lenguaje, el ruido de fondo no se mide, se evalúa. Como se ha comentado, para poder considerar un sonido como ruido de fondo, este tiene que producirse de forma simultánea a la medida. En el ejemplo anterior, si cuando suena el teléfono yo no estuviera midiendo, eso no afectaría para nada a la medida, y no sería ruido de fondo, ¿para qué lo voy a medir? Como se produce de forma simultánea, no es posible separar el ruido de interés (específico) del ruido de fondo. Por lo tanto, hay que buscar una forma de evaluar el ruido de fondo.

Evaluación del ruido de fondo.

Para evaluar el ruido de fondo, en primer lugar, el técnico debe intentar minimizar la influencia de todas las fuentes de ruido ajenas a la materia de inspección. Apagar el móvil, la tele, la radio, pedir silencio,... o buscar los momentos oportunos, en los que el ruido de fondo sea más bajo. En este punto, no se tiene más control sobre el ruido de fondo, pero sí sobre la fuente sonora. Así pues, se pondrá en funcionamiento la fuente de ruido objeto de inspección, y se efectuará una primera ronda de mediciones (dependiendo del plan de muestreo, modos de funcionamiento, requisitos legislativos,...). Estas mediciones estarán afectadas por ruido de fondo. A continuación debe apagarse la fuente de ruido, y repetir la medida.

Importancia de la medida de ruido de fondo.

La "medida" (evaluación) del ruido de fondo, es muy importante. Debe procurarse que la única circunstancia "acústica" distinta entre ambas medidas sea el apagado de la fuente de ruido.

Además, su medida implica las mismas precauciones que la medida del ruido de la fuente, muestreo, tiempos de medida,... Ya que la evaluación acústica de una actividad, se verá afectada por el resultando de esta determinación.

Lección 18: Tipos de Ruido.

El Ruido no es Sólo Ruido

En casa y en el trabajo a menudo oímos ruidos, procedentes de sistemas de ventilación o de calefacción, a los cuales difícilmente prestamos atención ya que no tienen características destacables. Esos ruidos nunca paran y no tienen tono, pero si de repente el ventilador se parara o empezara a zumbar, el cambio podría llamarnos la atención o incluso molestarnos. Nuestro oído reconoce información en los sonidos que escuchamos. La información que no necesitamos o que no queremos pasa a ser ruido. Las características del ruido que nos hacen atender y prestar atención son tonos o cambios en el nivel sonoro. Cuanto más destacable sea el tono o más abrupto el cambio de nivel sonoro, más perceptible es el ruido.

Cuando medimos el ruido, necesitamos saber el tipo de ruido que es con el fin de que podamos seleccionar los parámetros a medir, el equipo a usar y la duración de las mediciones. A menudo tenemos que utilizar nuestro oído para captar y subrayar las características molestas del ruido, antes de empezar a tomar medidas, analizarlas y documentarlas.

Ruido Continuo.

El ruido continuo se produce por maquinaria que opera del mismo modo sin interrupción, por ejemplo, ventiladores, bombas y equipos de proceso. Para determinar el nivel de ruido es suficiente medir durante unos pocos minutos con un equipo manual. Si se escuchan tonos o bajas frecuencias, puede medirse también el espectro de frecuencias para un posterior análisis y documentación.

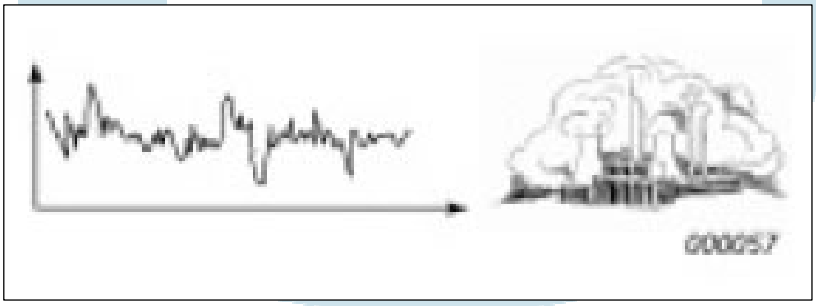

Figura 3. Ejemplo de Ruido Continuo.

Ruido Intermitente.

Cuando la maquinaria opera en ciclos, o cuando pasan vehículos aislados o aviones, el nivel de ruido aumenta y disminuye rápidamente. Para cada ciclo de una fuente de ruido de maquinaria, el nivel de ruido puede medirse simplemente como un ruido continuo. Pero también debe anotarse la duración del ciclo. El paso aislado de un vehículo o aeronave se llama suceso. Para medir el ruido de un suceso, se mide el Nivel de Exposición Sonora, que combina en un único descriptor tanto el nivel como la duración. El nivel de presión sonora máximo también puede utilizarse. Puede medirse un número similar de sucesos para establecer una media fiable.

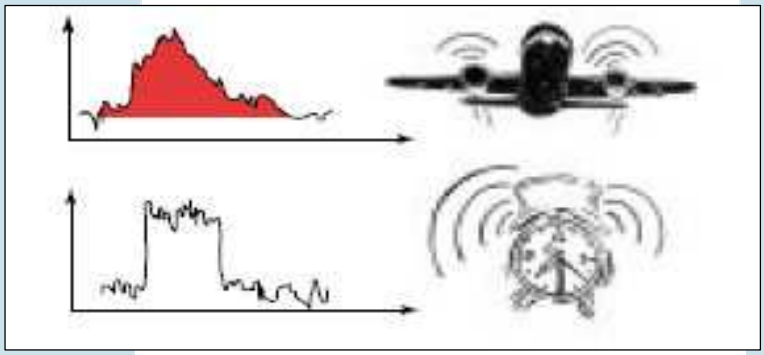

Figura 4. Ejemplo de Ruido Intermitente.

Ruido Impulsivo.

El ruido de impactos o explosiones, por ejemplo de un martinete, troqueladora o pistola, es llamado ruido impulsivo. Es breve y abrupto, y su efecto sorprendente causa mayor molestia que la esperada a partir de una simple medida del nivel de presión sonora. Para cuantificar el impulso del ruido, se puede utilizar la diferencia entre un parámetro con respuesta rápida y uno de respuesta lenta (como se ve en la base del gráfico). También deberá documentarse la tasa de repetición de los impulsos (número de impulsos por segundo, minuto, hora o día).

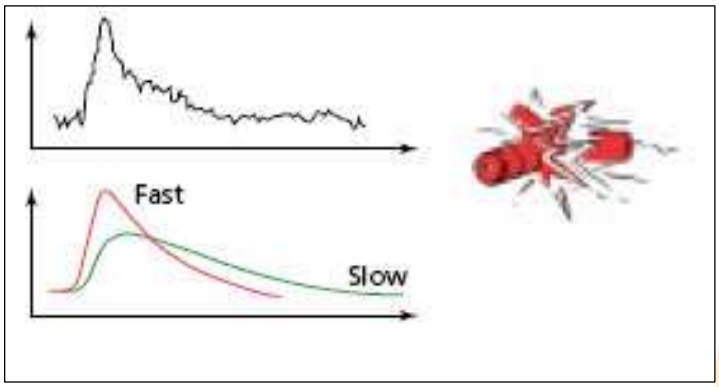

Figura 5. Ejemplo de Ruido Impulsivo.

Tonos en el Ruido.

Los tonos molestos pueden verse generados de dos maneras: Frecuentemente las máquinas con partes rotativas tales como motores, cajas de cambios, ventiladores y bombas, crean tonos. Los desequilibrios o impactos repetidos causan vibraciones que, transmitidas a través de las superficies al aire, pueden ser oídos como tonos. También pueden generar tonos los flujos pulsantes de líquidos o gases que se producen por causa de procesos de combustión o restricciones de flujo. Los tonos pueden ser identificados subjetivamente, escuchándolos, u objetivamente mediante análisis de frecuencias. La audibilidad se calcula entonces comparando el nivel del tono con el nivel de los componentes espectrales circundantes.También deberá documentarse la duración del tono.

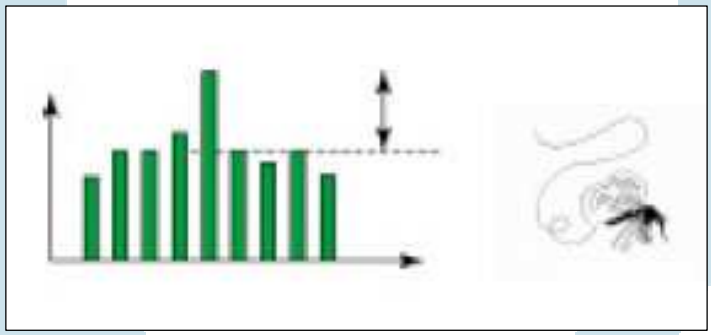

Figura 6. Ejemplo de Tonos en El ruido.

Ruido de Baja Frecuencia.

El ruido de baja frecuencia tiene una energía acústica significante en el margen de frecuencias de 8 a 100 Hz. Este tipo de ruido es típico en grandes motores diesel de trenes, barcos y plantas de energía y, puesto que este ruido es difícil de amortiguar y se extiende fácilmente en todas direcciones, puede ser oído a muchos kilómetros. El ruido de baja frecuencia es más molesto que lo que se cabría esperar con una medida del nivel de presión sonora ponderado A. La diferencia entre el nivel sonoro ponderado A y el ponderado C puede indicar la existencia o no de un problema de ruido de baja frecuencia. Para calcular la audibilidad de componentes de baja frecuencia en el ruido, se mide el espectro y se compara con el umbral auditivo. Los infrasonidos tienen un espectro con componentes significantes por debajo de 20 Hz. Lo percibimos no como un sonido sino más bien como una presión. La evaluación de los infrasonidos es aún experimental y en la actualidad no está reflejado en las normas internacionales.

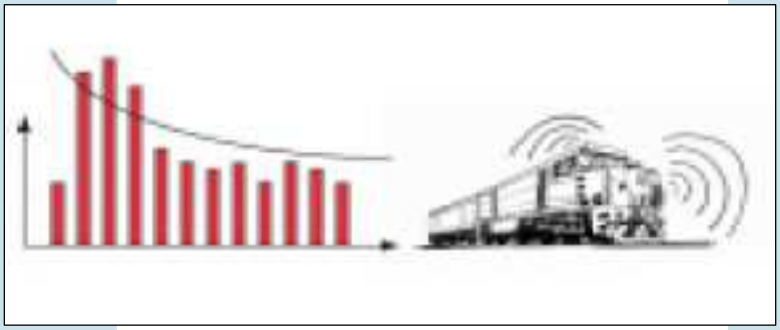

Figura 7. Ejemplo de Ruido en Baja Frecuencia.

Lección 19: Ruido Rosa, Ruido marrón y Ruido Blanco.

Ruido rosa.

Se denomina ruido rosa a una señal o un proceso con un espectro de frecuencias tal que su densidad espectral de potencia es proporcional al recíproco de su frecuencia. Su contenido de energía por frecuencia disminuye en 3 dB por octava. Esto hace que cada banda de frecuencias de igual anchura (en octavas) contenga la misma energía total. Un ejemplo de aplicación de este tipo de ruido es la obtención de respuesta en frecuencia de amplificadores de audio clase A, de manera que se reduzca el efecto de distorsión de segundo y tercer armónico que producen.

Por el contrario, el ruido blanco, que tiene la misma intensidad en todas las frecuencias, transporta más energía total por octava cuanto mayor es la frecuencia de ésta. Por ello, mientras el timbre del ruido blanco es silbante como un escape de vapor (como "Pssss..."), el ruido rosa es más apagado al oído (parecido a "Shhhh...").

El perfil del espectro de un ruido rosa es plano y horizontal cuando el eje de las frecuencias sigue una escala logarítmica (graduada en octavas). Si el eje de frecuencias sigue una escala lineal, el perfil del espectro es una línea recta que baja hacia la derecha, con una pendiente de 3 dB/oct.

Se usa mucho como señal de prueba en mediciones acústicas. El espectro del ruido rosa es semejante al espectro medio acumulado de la música sinfónica o de instrumentos armónicos como el piano o el órgano.

El nombre "ruido rosa" obedece a una analogía con la luz blanca (que es una mezcla de todos los colores) que, después de ser coloreada de forma que se atenúen las frecuencias más altas (los azules y violetas) resulta un predominio de las frecuencias bajas (los rojos). Así pues, el ruido rosa es ruido blanco coloreado de manera que es más pobre en frecuencias altas (sonidos agudos).

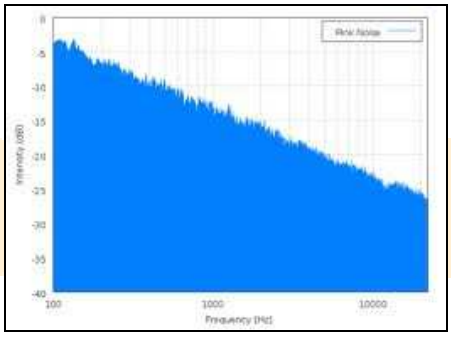

Grafico 19. Representación grafica del Ruido Rosa.

Ruido Marrón.

Ruido browniano, también conocido como Ruido marrón o ruido rojo, es la clase de ruido de la señal producido cerca Movimiento browniano. El término “ruido del marrón” viene no del color, pero en honor de Robert Brown, el descubridor de Movimiento browniano.

La representación gráfica de la señal de sonidos mímico un patrón browniano. Su densidad espectral es proporcional al cuadrado de 1/f, el significar que tiene más energía en frecuencias más bajas, aun más que ruido rosado. Disminuye en energía por 6 DB por octava y, cuando está oído, tiene una calidad humedecido” o de la “suavidad” “comparada a blanco y ruido rosado. Vea también ruido púrpura, que es un aumento del DB 6 por octava.

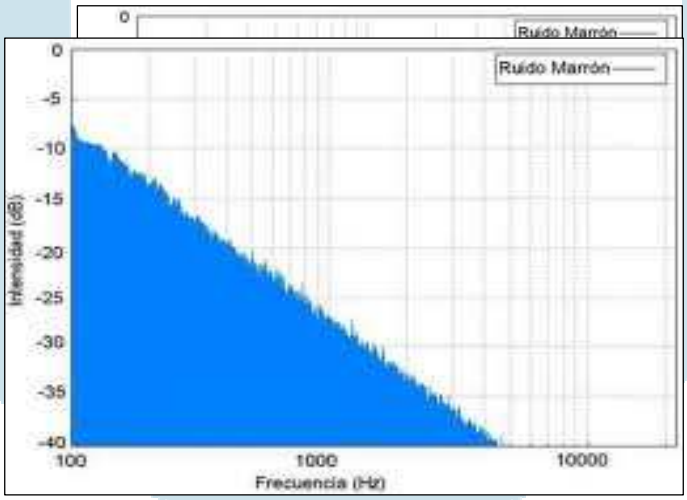

Grafico 20. Representación grafica del Rudio Marrón.

Rudio Blanco.

Ruido blanco se define como ruido aleatorio que contiene energía constante a cada frecuencia o más preciso una distribución uniforme de la energía sobre el espectro de frecuencias. El ruido que se oye en un radio FM cuando se sintoniza fuera de una estación emisora es aproximadamente ruido blanco.

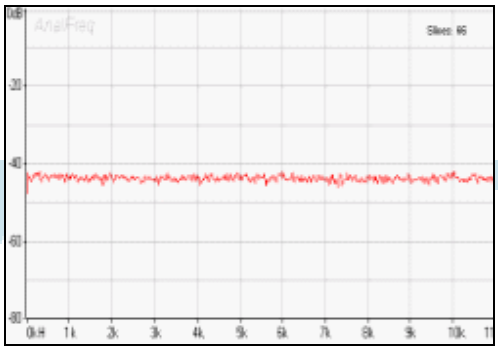

Grafico 21. Representación grafica del Ruido Blanco

CAPITULO 5. ACUSTICA Y FENOMENOS ACUSTICOS.

Lección 20: Historia y Definición de la Acústica.

La palabra acústica designa todo lo referente al sentido del oído, pero comúnmente se la usa con uno de estos dos significados: primero, el cuerpo de hechos y teoría que concierne a las propiedades, producción y transmisión del sonido. Segundo, la adaptabilidad de un edificio para oír en él discursos y música. Así pues hablamos de la ciencia de la acústica y también de la acústica de una sala de conciertos.

Historia.

Le dio el nombre el físico francés José Sauveur (1653−1716), este también fue unos de los creadores de esta ciencia. En la antigüedad y en la edad media se hicieron diferente experimentos vibratorios, desde el monocordio de Pitágoras, pasando por los principios de Gioseffo Zarlino a mediados del siglo XVI, Salinas, Galileo e Isaac Newton, hasta llegar a Pithanasius Kichev y el número p Marin Mersenne, ya en el siglo XVII, quienes aplicaron muchas de las precedentes experiencias a los instrumentos musicales. Joseph Sauveur dio a estos estudios el nombre de acústica y creó esta especialidad, que desarrollaron diferentes científicos posteriores profundizando en sus aspectos peculiares: Daniel Bernouilli en los sonidos armónicos, Euler en las vibraciones y Félix Savart en el aspecto fisiológico y aplicación a los instrumentos; finalmente, en 1863 Hermann Ludwig F. Helmholtz reunió todos los avances aportados hasta el momento. Posteriormente la invención de fonógrafo (Thomas Alva Edison, 1877), radio, cine, magnetófono y televisión han contribuido al enorme progreso de esta ciencia. Más recientemente, la electroacústica ha permitido un análisis más detallado de los sonidos e incluso su síntesis. La acústica arquitectónica trata de obtener, por un lado, la mejor audición del sonido en un edificio mediante el estudio de las formas y la elección de los materiales y, por otro, el aislamiento acústico de los locales, tanto entre sí como del exterior.

Definición.

Es una ciencia que estudia las cuestiones relativas al sonido, especialmente la generación y recepción de las ondas sonoras. Todo fenómeno sonoro consta de tres momentos: la producción, la propagación y la recepción del sonido.

La producción: está unida al hecho de que un cuerpo, la fuente sonora, inicie unas vibraciones; de ello se deduce que la acústica estudia los movimientos vibratorios.

La propagación: del sonido desde la fuente emisora hasta el oído necesita un medio material, ya sea gaseoso, sólido o líquido.

La recepción del sonido: pertenece al mundo de la fisiología o, incluso, de la psicología.

La acústica estudia las diferentes aplicaciones instrumentales y musicales de las leyes físicas del sonido, como con su aplicación construcción de instrumentos y de salas de concierto. La acústica puede dividirse en tres direcciones distintas: física o matemática, fisiológica, aplicada.

.

Lección 21: Generalidades Fenómenos Acústicos

La acústica física está dedicada al estudio de los fenómenos que se producen durante la producción y propagación del sonido. Todos estos caracteres que sobresalen, desde el origen de una onda sonora, propician una diversidad de fenómenos que son objetos para la acústica física.

Entre los fenómenos más importantes para la acústica figuran aquellos que tienen lugar durante la incidencia de la onda sonora sobre una superficie (reflexión, absorción, difracción y transmisión).

"En la naturaleza existen algunos fenómenos acústicos, estos fenómenos tales como reflexión, difracción, y absorción, son una serie de eventos que se dan cuando en un medio elástico se propaga una onda sonora y esta se encuentra con una superficie de separación entre el medio que se propaga y otro de otra densidad". (Calvo: 1991)

Lección 22: Reflexión Sonora.

La reflexión es un fenómeno de la propagación del sonido, junto con la trasmisión, absorción y la difracción. La refracción sonora se produce cuando una onda choca con una superficie, la onda que choca se denomina onda incidente y la nueva onda que aparece a partir de este choque se llama onda reflejante, el ángulo en el que sale la onda reflejante es el negativo del ángulo de la onda incidente.

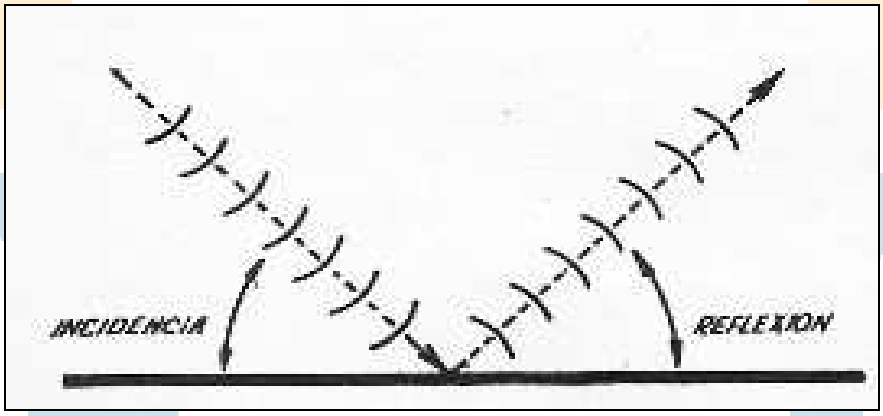

Figura 8. Ejemplo de una reflexión especular.

Cuando una onda incide sobre una superficie límite de dos medios, de distintas propiedades mecánicas, ópticas, etc., parte de la onda se refleja, parte se disipa y parte se transmite. La velocidad de propagación de las ondas, v, cambia al pasar de un medio a otro, pero no cambia la frecuencia angular w.

La reflexión de una onda cumple una ley matemática de Snell, que dice que el ángulo de la onda reflejante es el inverso del ángulo de la onda incidente.

$$\text{Ley de la reflexión:} \qquad \theta_1 = \theta'_1$$

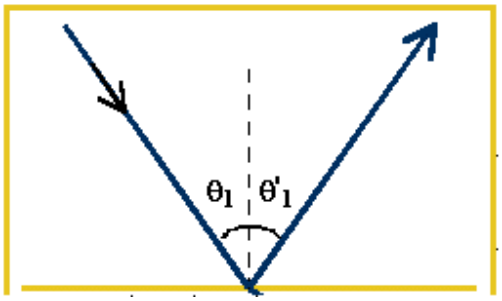

Figura 9. Representación Grafica de la Ley de la Reflexión.

La reflexión de una onda sonora depende de la longitud de onda de la onda incidente y de la densidad del material reflector.

Este fenómeno, que se aprecia muy claramente con la luz en un espejo, se produce de igual forma con el sonido. Cuando el sonido tropieza con un obstáculo, lo que hace la mayor parte de la energía (siempre hay algo que se transmite y en el objeto) de la onda, es cambiar de fase y volver por el mismo camino por el que ha llegado, pero en sentido contrario. Precisamente, las reflexiones son un efecto a evitar en las salas de audición puesto que enturbian la pureza de la pieza musical que se esto oyendo en ese momento. Los materiales más duros, como pasa con las montañas, sobretodo paredes verticales, son los que ofrecen un índice de reflexión mayor, de ahí la frecuencia de aparición del fenómeno del eco en estos entornos (que dependiendo del retraso que se produzca en las reflexiones podremos hablar de eco o de reverberación).

En cuanto a la forma de propagación del sonido, podíamos establecer una diferencia entre el sonido directo y el sonido indirecto. Respecto a este último modo de propagación es donde se produce el fenómeno de reflexión.

Ya que el sonido indirecto se produce al ser reflejado por paredes, techos u objetos, para que se produzca este hecho habrá que tener en cuenta la naturaleza del elemento, la forma y la rugosidad superficial. En este fenómeno entran en juego la longitud de onda del sonido y el tamaño del objeto con el cual choca.

Cuando el sonido choca con un objeto cuyo tamaño sea igual o mayor que su longitud de onda, se producirá una reflexión del mismo, dando origen al sonido indirecto. Sin embargo, cuando el objeto es menor que su longitud de onda lo que se produce es la difracción del sonido.

Pero hay diversos factores que intervienen e influyen en la reflexión. El más importante es el material del que está constituido el objeto con el que choca, provocando reacciones muy diferentes, ya que las ondas sonoras pueden ser absorbidas por determinados materiales o producir reflexiones que en ciertos casos pueden ser beneficiosas, ya que vienen a reforzar el sonido directo, y en otros perjudiciales, ya que van a producir fenómenos de reverberación y eco. En todos los casos el ángulo con el que se refleja el sonido es idéntico al ángulo incidente de choque cuando este efecto se produce sobre objetos lisos, mientras que este ángulo no es igual cuando el choque se produce con objetos rugosos o, a los menos, no planos.

Por tal motivo es preciso tener en cuenta los fenómenos de absorción. Como principio general, destacaremos que los objetos lisos, pesados y rígidos son reflectantes, mientras que los rugosos y porosos son absorbentes.

Lección 23: Absorción Sonora

Llamamos absorción del sonido, a la propiedad de los materiales, estructuras y objetos, de convertir energía sonora en calor. Este efecto puede producirse por propagación en el medio, o por disipación cuando el sonido incide sobre su superficie.

Disipación de la Energía Sonora.

La ley de conservación de la energía dice que ésta no puede desaparecer ni destruirse, por lo que es lógico que cambie de forma. En el caso de la energía sonora, las vibraciones de las moléculas de aire, se transformarán en calor.

La figura 10, representa el corte de una pared de ladrillo revestida con un material acústico. La acción del sonido S, incidente sobre la pared, tendrá tres efectos:

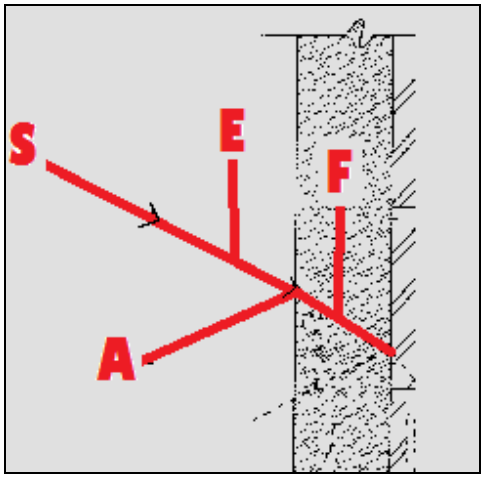

Figura 10. Esquema de disipacion de energia sonora en una pared de ladrillo.

- Una parte se reflejará en la dirección de A.
- Otra, se disipará en el aire en forma de calor (E), éste efecto será más apreciable en altas frecuencias.
- El resto del sonido penetrará el material, cambiando su dirección, por tratarse de uno más denso, y disipando parte de su energía nuevamente en calor (F).

Cuando esta señal encuentre la pared de ladrillos, nuevamente una parte se reflejará disipando calor y otra parte se refractará cambiando de dirección.

Este proceso se repetirá en forma continua con sucesivos cambios de dirección, reflexiones, refracciones y pérdidas de energía. Afortunadamente, todas estas pérdidas y cambios en la dirección del sonido, no son necesarios para resolver problemas prácticos, pero ayudan a entender el comportamiento del mismo en los materiales.

Evaluación de la absorción del sonido.

Definimos absorción como: "El comportamiento de un material acústico que, en presencia de energía sonora, parte de la misma se transforma en otro tipo de energía, usualmente en calor". Podemos decir que el campo reverberante dentro de un recinto depende de la relación entre la energía incidente y la energía absorbida en cada una de las reflexiones.

Esta relación es un coeficiente llamado coeficiente de absorción, que se expresa como:

$$\alpha = E_{abs} / E_{inc}$$

Donde:

E_{abs} = Energía absorbida por el material.

E_{inc} = Energía incidente sobre el material.

El coeficiente expresa la energía absorbida por unidad de área del material, variando su valor con la frecuencia. Se especifica en unidades de absorción por metro cuadrado o por pie cuadrado (según el sistema adoptado), a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. Esta evaluación deberá hacerse sobre cada material que compone el recinto.

El valor máximo que puede tomar α es uno.

Lección 24: Difracción Sonora

La difracción es un fenómeno que afecta a la propagación del sonido. Hablamos de difracción cuando el sonido en lugar de seguir en la dirección normal, se dispersa en una continua dirección.

La explicación la encontramos en el Principio de Huygens que establece que cualquier punto de un frente de ondas es susceptible de convertirse en un nuevo foco emisor de ondas idénticas a la que lo originó. De acuerdo con este principio, cuando la onda incide sobre una abertura o un obstáculo que impide su propagación, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, denominadas ondas difractadas.

La difracción se puede producir por dos motivos diferentes:

1. Porque una onda sonora encuentra a su paso un pequeño obstáculo y lo rodea. Las bajas frecuencias son más capaces de rodear los obstáculos que las altas. Esto es posible porque las longitudes de onda en el espectro audible están entre 1,7cm y 17m, por lo que son lo suficientemente grandes para superar la mayor parte de los obstáculos que encuentran.

2. Porque una onda sonora topa con un pequeño agujero y lo atraviesa.

La cantidad de difracción estará dada en función del tamaño de la propia abertura y de la longitud de onda.

Si una abertura es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño. La onda se propaga en líneas rectas o rayos, como la luz.

Cuando el tamaño de la abertura es menor en comparación con la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y el sonido se comporta como si fuese una luz que procede de una fuente puntual localizada en la abertura.

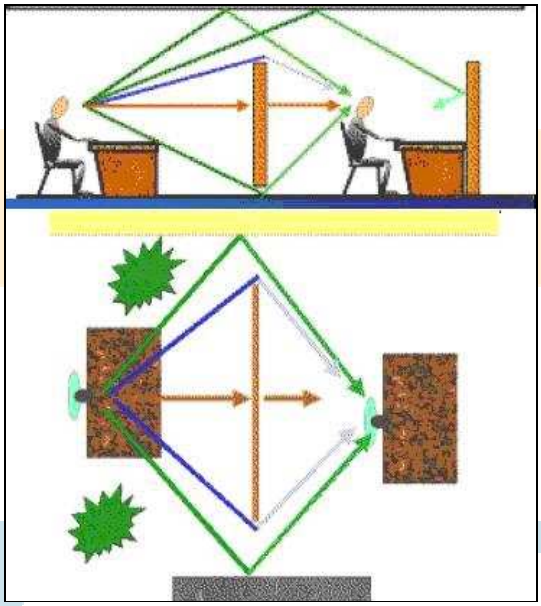

Figura 11. Ejemplo de de difracción sonora (flechas Blancas).

Lección 25: Transmisión Sonora

al sonar las bocinas del radio, cuando esta encendido, se percibe como vibran con el sonido de la voz o la música, lo mismo ocurre si se coloca una mano en la garganta cuando hablamos; esto es debido a que el sonido es producido por la vibración de un cuerpo elástico, transmitiéndose mediante el movimiento ondulatorio longitudinal.

Los sonidos son diferentes unos de otros, la voz de un ser humano se puede distinguir del sonido que emiten los pájaros, de un instrumento musical o del viento; pero para que pueda transmitirse requiere de un medio que puede ser gaseoso, solido o liquido.

El ser humano requiere del aire para comunicarse mediante los diversos sonidos, los peces del agua y algunos animales como los topos y castores de la tierra que es salida. En el vacio el sonido no se propaga puesto que no tiene medio por el cual transmitirse.

Lección 26: Efecto Doppler.

Siempre que una fuente sonora se mueve en relación con un oyente, el tono del sonido, como lo escucha el observador, puede no ser el mismo que el que percibe cuando la fuente está en reposo. Por ejemplo, si uno está cerca de la vía del ferrocarril y escucha el silbato del tren al aproximarse, se advierte que el tono del silbido es más alto que el normal que se escucha cuando el tren está detenido. A medida que el tren se aleja, se observa que el tono que se escucha es más bajo que el normal. En forma similar, en las pistas de carreras, el sonido de los automóviles que se acercan a la gradería es considerablemente más alto en tono que el sonido de los autos que se alejan de la gradería.

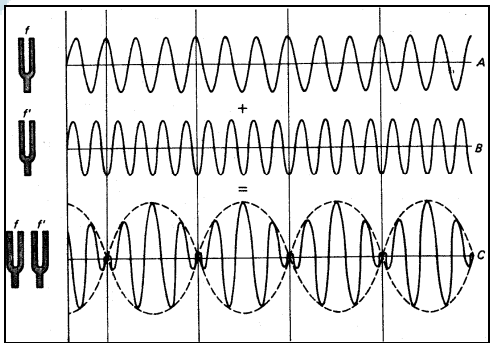

Figura 12. Diagrama que muestra el origen de las pulsaciones. La onda C es una superposición de ondas A y B.

El fenómeno no se restringe al movimiento de la fuente. Si la fuente de sonido está fija, un oyente que se mueva hacia la fuente observará un aumento similar en el tono. Un oyente que se aleja de la fuente de sonido escuchará un sonido de menor tono. El cambio en la frecuencia del sonido que resulta del movimiento relativo entre una fuente y un oyente se denomina efecto Doppler.

El efecto Doppler se refiere al cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo de la fuente y del oyente.

El origen del efecto Doppler se puede demostrar gráficamente por medio de la representación de las ondas periódicas emitidas por una fuente como círculos

concéntricos que se mueven en forma radial hacia fuera. La distancia entre cualquier par de círculos representa la longitud de onda del sonido que se desplaza con una velocidad V. La frecuencia con que estas ondas golpean el oído determina el tono de sonido escuchado.

Consideremos en primer lugar que la fuente se mueve a la derecha hacia un observador A inmóvil. A medida que la fuente en movimiento emite ondas sonoras, tiende a alcanzar las ondas que viajan en la misma dirección que ella. Cada onda sucesiva se emite desde un punto más cercano al oyente que la onda inmediata anterior. Esto da por resultado que la distancia entre las ondas sucesivas, o la longitud de onda, sea menor que la normal. Una longitud de onda más pequeña produce una frecuencia de ondas mayor, lo que aumenta el tono del sonido escuchado por el oyente A. Mediante un razonamiento similar se demuestra que un incremento en la longitud de las ondas que llegan al oyente B hará que B escuche un sonido de menor frecuencia.

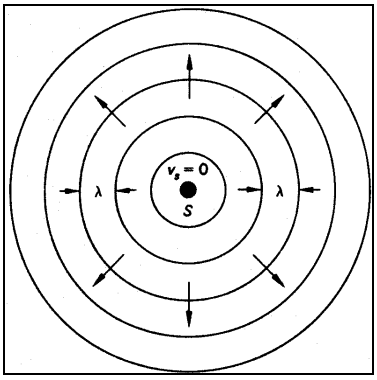

Figura 13. Representación gráfica de ondas sonoras emitidas desde una fuente fija.

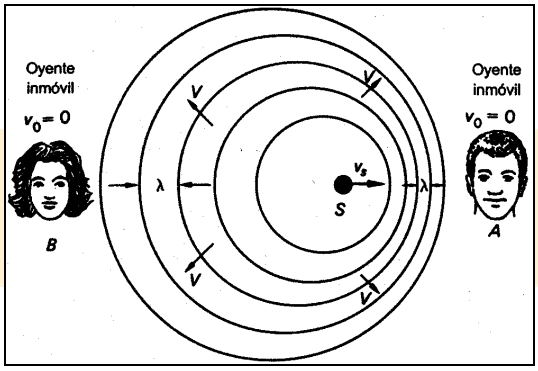

Figura 14. Ilustración del efecto Doppler. Las ondas frente a una fuente en movimiento están más cercanas entre sí que las ondas que se propagan detrás de la fuente móvil.

Ahora podemos deducir una relación para predecir el cambio en la frecuencia observada. Durante una vibración completa de la fuente estacionaria (un tiempo igual al del periodo T), cada onda se moverá a lo largo de una distancia de una longitud de onda. Esta distancia de una longitud de onda. Esta distancia se presenta con ʎ y está dada por:

$$\lambda = VT = \frac{V}{f_s}$$

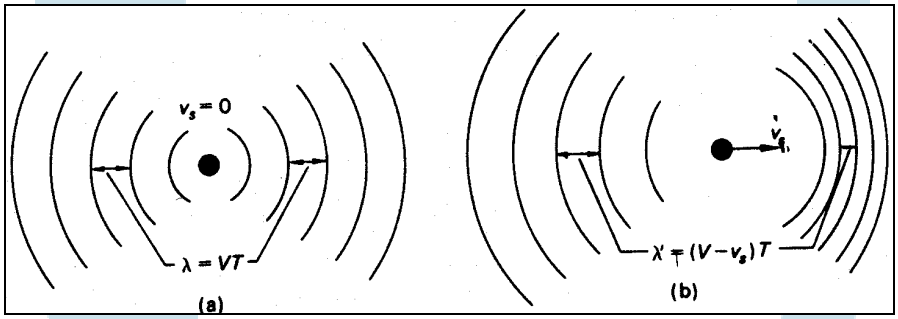

Figura 15.Cálculo de la magnitud de la longitud de onda del sonido que se emite desde una fuente en movimiento. La velocidad de la fuente Vs se considera positiva para velocidades de acercamiento y negativa para velocidades de alejamiento.

Donde V es la velocidad de sonido y fs es la frecuencia de la fuente. Si la fuente se mueve a la derecha con una velocidad Vs, la nueva longitud de onda ʎ' al frente de la fuente será:

$$\lambda' = VT - VsT = (V - Vs)\,T$$

Esta ecuación también se aplica para la longitud de onda a la izquierda de la fuente en movimiento si seguimos la convención de que las velocidades al aproximarse se consideran positivas, y las velocidades al alejarse se consideran negativas. Por lo tanto, si calculamos ʎ' a la izquierda de la fuente en movimiento, el valor negativo sería sustituido para Vs' dando por resultado una mayor longitud de onda.

La velocidad del sonido en un medio es función de las propiedades del medio y no depende del movimiento de la fuente. Así, la frecuencia f0 escuchada por un oyente inmóvil y proveniente de una fuente en movimiento de frecuencia fs' está dada por:

$$\boxed{f_o = \frac{V}{\lambda'} = \frac{Vf_s}{V - v_s}}$$

Donde V es la velocidad del sonido y Vs es la velocidad de la fuente. La velocidad Vs se considera como positiva para velocidades de acercamiento y negativa para velocidades de alejamiento.

CAPITULO 6. MEDICION ACUSTICA, INSTRUMENTACION Y NORMATIVIDAD

Lección 27: Generalidades Medición Acústica

Las mediciones acústicas fueron diseñadas para poder medir objetivamente los diferentes parámetros acústicos que involucran un recinto, o espacio. Antes de intentar corregir acústicamente un espacio o recinto debemos definir qué es lo que queremos corregir y como lo vamos a corregir. Para eso necesitamos medir de acuerdo con el objetivo a lograr, ciertos parámetros acústicos.

Para que este tipo de mediciones sean estandarizadas existen ciertos protocolos de medición que han venido diseñando las distintas organizaciones que se encargan de certificar calidad en los procesos; y organizaciones de acústica y sonido independientes. A este tipo de protocolos los conocemos como normatividad. Algunas de estas organizaciones son:

- ISO (international organization for standardization)
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- AES (Audio Engineers Society)
- INCONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas)

Cada país tiene su propio instituto que abala estos protocolos o se acogen a protocolos internacionales como los de ISO, AES o IEEE.

Después de haber realizado una insonorización, un control acústico de ruido, o un tratamiento acústico o cualquier solución acústica, se debe medir nuevamente para poder establecer la cantidad de solución aplicada al trabajo realizado.

Para realizar este tipo de mediciones se debe señir al pie de la letra lo estipulado en la norma hay normas más especificas que otras, pero de ello dependerá la calidad de la medición y algunas exigen instrumentación de medida especial que conoceremos en el desarrollo de este capítulo.

Lección 28: Medición Acústica.

En acústica se miden los parámetros acústicos de los recintos o espacios físicos como tal, cada uno de ellos se mide de acuerdo a la necesidad o la problemática que el recinto presente, cada parámetro acústico lo desglosaremos y lo miraremos en capítulos posteriores.

Cada medición de los parámetros acústicos generalmente necesita de un sonómetro integrador, de un micrófono de medición, de un tipo de fuente, y de cables y accesorios necesarios para conectar y calibrar los instrumentos de medición. En algunos casos el sonómetro puede ser remplazado por un computador con el programa adecuado, una interface de audio y un micrófono de medición.

Los parámetros acústicos que generalmente se miden son:

Medición Tiempo de Reverberación (Rt): el tiempo de reverberación hace referencia al tiempo que tarda en caer un sonido 60db después de emitido el mismo. Se mide únicamente en recintos cerrados o grandes arenas nunca al aire libre y se mide para cada banda de octava, este tiempo es directamente proporcional al volumen de los recintos y la absorción de los materiales del mismo, un elevado tiempo de reverberación afecta el nivel de inteligibilidad (entendimiento de la palabra) y es una de las principales parámetros de control a tener en cuenta a la hora de diseñar o hacer control acústico.

Para la medición de este tiempo de reverberación se hace necesario un sonómetro integrador con micrófono de medición, una fuente impulsiva como globos, disparo o un deta dirac (impulso elaborado electrónicamente) y ciertos criterios de medida que según las normas variarían.

Medición Nivel Continuo equivalente (Leq): El nivel continuo equivalente es un parámetro que se obtiene promediando muchas mediciones en tiempos prolongados, es la medición más efectiva para elaborar mapas de ruido o establecer incidencias de ruido (excepto el ruido de tráfico aéreo), se puede medir

en cualquier lugar sea recinto o no. Su medición es un poco engorrosa puesto que depende de mucho tiempo de medición, y se obtienen millones de datos para cada banda de octava que después tendremos que correlacionar y analizar. Para ello se necesita de un sonómetro integrador con micrófono de medición y de la correlación de la medición. La calidad de esta medición dependerá directamente de la calidad del buffer del sonómetro integrador, no es el mismo Leq de un sonómetro que en 8 horas tomo 500.000 mediciones que el Leq de un sonómetro que tomo 2.000.000 en las mismas ocho horas.

Medición de Claridad (C80): La claridad hace referencia al promedio de la cantidad de energía sonora que llega los primeros 80 milisegundos. Este parámetro solo se puede establecer en recintos cerrados, y es uno de los parámetros a seguir en el diseño de grandes teatros, halls de concierto y recintos donde la calidad sonora necesite prelación, a mayor claridad mejor se percibe el sonido dentro del recinto.

Para la medición de este parámetro, se hace necesario un sonómetro integrador con micrófono de medición, la fuente para la medición puede ser de varios tipos, fuente impulsiva, fuente continua, y algunas señales utilizadas en estas mediciones.

Medición del Nivel de Inteligibilidad: La inteligibilidad es el nivel de entendimiento de la palabra, este parámetro se mide de manera estadística se puede medir en cualquier lugar, para su medición se requiere de una encuesta diseñada con palabras especificas (estas palabras las especifica los protocolos de medición), de personas que escucharan en distintos puntos del lugar y anotaran exactamente lo que escuchan y de un locutor o sistema sonoro que reproducirá estas palabras al las personas que escuchan.

Perdida por transmisión (LT): La pérdida por transmisión hace referencia al porcentaje de energía perdido al transmitir una onda sonora por una superficie

cualquiera. Este parámetro es muy importante para aislamiento acústico y insonorización. Se puede medir en cualquier lugar pero necesariamente se tiene que medir en dos lugares, el primero en donde la onda incide sobre la superficie dada, y el segundo donde la onda se transmite, para ello se necesita de una sonómetro integrador con micrófono de medición, y de una fuente de ruido continua.

Distancia Crítica: La distancia crítica es el punto en donde un campo sonoro directo termina y empieza el campo reverberante, este parámetro solo se mide en recintos cerrados y sirve para el tratamiento acústico de un recinto. Para la medición de este se requiere un sonómetro integrador con micrófono y una fuente continua de ruido.

Lección 29: Instrumentos de Medición.

A continuación miraremos los instrumentos de medición que existen para poder llevar a cabo la medición de los distintos parámetros acústicos.

Sonómetro.

El sonómetro es un instrumento de medida que sirve para medir niveles de presión sonora (de los que depende la amplitud y, por tanto, la intensidad acústica y su percepción, sonoridad). En concreto, el sonómetro mide el nivel de ruido que existe en determinado lugar y en un momento dado. La unidad con la que trabaja el sonómetro es el decibelio. Si no se usan curvas ponderadas (sonómetro integrador), se entiende que son (dB SPL).

Cuando el sonómetro se utiliza para medir lo que se conoce como contaminación acústica (ruido molesto de un determinado paisaje sonoro) hay que tener en cuenta qué es lo que se va a medir, pues el ruido puede tener multitud de causas y proceder de fuentes muy diferentes. Para hacer frente a esta gran variedad de ruido ambiental (continuo, impulsivo, etc.) se han creado sonómetros específicos que permitan hacer las mediciones de ruido pertinentes. En los sonómetros la medición puede ser manual, o bien, estar programada de antemano. En cuanto al tiempo entre las tomas de nivel cuando el sonómetro está programado, depende del propio modelo. Algunos sonómetros permiten un almacenamiento automático que va desde un segundo, o menos, hasta las 24 horas. Además, hay sonómetros que permiten programar el inicio y el final de las mediciones con antelación. La norma IEC 60651 y la norma IEC 60804, emitidas por la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), establecen las normas que han de seguir los fabricantes de sonómetros. Se intenta que todas las marcas y modelos ofrezcan una misma medición ante un sonido dado. La CEI también se conoce por sus siglas en inglés: IEC (International Electrotechnical Commission), por lo que las normas aducidas también se conocen con esta nomenclatura: IEC 60651 (1979) y la IEC 60804 (1985). A partir del año 2003, la norma IEC 61.672 unifica ambas normas en una sola. Además, en todos los países, normas nacionales e

internacionales clasifican los sonómetros en función de su grado de precisión. Se establecen 4 tipos en función de su grado de precisión. De más a menos:

- Sonómetro de clase 0: se utiliza en laboratorios para obtener niveles de referencia.
- Sonómetro de clase 1: permite el trabajo de campo con precisión.
- Sonómetro de clase 2: permite realizar mediciones generales en los trabajos de campo.
- Sonómetro de clase 3: es el menos preciso y sólo permite realizar mediciones aproximadas, por lo que sólo se utiliza para realizar reconocimientos.

La norma IEC 61.672 elimina las clases 0 y 3, restando exclusivamente las clases 1 y 2.

Figura 16. Sonómetro.

Micrófonos de medición.

Los micrófonos de medición están diseñados para que su respuesta de frecuencia sea ultra plana, y no coloreen el sonido en ningún punto del espectro, este diseño especial los hace mucho más costosos y su diafragma es más delicado que el de los originales.

Figura 17. Microfono de medición.

Calibradores.

Los calibradores son dispositivos creados generalmente para reproducir un tono de 1kHz a 94dB tienen forma cilíndrica y una cavidad donde el micrófono de medición entra para ser calibrado, la función que cumple es la de ser la referencia para poder calibrar un sonómetro o sistema de medición en 94 dB para poder realizar la medición con valores reales en dBs.

Figura 18. Calibrador 94dB.

Señales.

Son los tipos de ondas o espectros que necesitamos para poder llevar a cabo las distintas mediciones acústicas. De ellas podemos encontrar:

Señales impulsivas: este tipo de señal es el más utilizado para medir tiempo de reverberación. Lo que se busca es un fuerte sonido que contenga todo el espectro sonoro pero que se extinga lo más rápido posible en el tiempo, este sonido lo podemos obtener inflando un globo y estallándolo, con una pequeña explosión como la que causa una pistola o con un delta dirac que es una señal generada matemáticamente y electrónicamente para que suene como una señal impulsiva.

Señales continuas: Se usan en la mayoría de mediciones, pueden ser señales de ruido continuo de ruidos blanco, rosa o café, o existen otras como el sine sweep que es una señal digital que hace un barrido de frecuencias de todo el espectro, el intervalo de tiempo de duración de todas estas señales se puede controlar según las necesidades de la medición.

Fuentes.

Las Fuentes son las que emiten las señales o ruidos necesarios para las mediciones existen de varios tipos algunas se ajustan a un tipo de señal más que otras.

Dodecaedro: esta es una de las fuentes más usadas porque intenta recrear una fuente esférica, una fuente que irradia energía en todas las direcciones. Consiste en una caja en forma dodecaedro que en cada uno de sus lados tiene un parlante muy plano por lo complejo de su diseño y construcción esta fuente puede llegar a ser muy costosa. Este tipo de fuentes las usan las empresas y laboratorios de mediciones acústicas.

Figura 19. Fuente de medición, Dodecaedro.

Fuentes de señales impulsivas: esta hacen referencia a los globos o pistolas de salva usadas también en las mediciones acústicas y de las que ya hemos hablado anteriormente.

Lección 30: Normatividad.

En Colombia existen algunas normas técnicas que las propone el INCONTEC. Y regulan mediciones acústicas en diferentes entornos. Aquí les presento algunas de ellas.

NTC 4194: Acústica. Medición de presión sonora a vehículos automotores en estado estacionario.

NTC 4653: Acústica. Directrices para la medición de la exposición al ruido en ambiente de trabajo

NTC 3437: Acústica. Ruido emitido por maquinaria y equipo. Pautas para la preparación de códigos de ensayo de ingeniería que requieren mediciones de ruido en la posición del operador o del espectador.

NTC 3522: Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1: cantidades básicas y procedimientos de evaluación.

NTC 3521: Acústica. Descripción y medición del ruido ambiental. Aplicación de los límites de ruido.

NTC 3992.Acustica. Medición acústica de ruido emitido por motores al acelerar

Alguna empresas y multinacionales acogen la normatividad internacional de la ISO o la IEEE para avalar distintas mediciones, o medir y entregar especificaciones de unidades acústicas como materiales. La normatividad Americana y europea de acústica es mucho más específica y objetiva que las normas que establecen los países latinos.

La norma más utilizada a nivel mundial para la medición de tiempo de reverberación es la ISO 3382.

Fuentes Documentales de la Unidad 2

- Acústica y Sistemas de Sonido, Ing. Federico Miyara. 1999.
- Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrot Isbert, 1998.
- Forsyth, M. (1.987) Auditoria, The Mitchell Publishing Company Limited, Londres
- Izenour, G. (1.977) Theater Design, McGraw Hill Book Company, Nueva York.
- Diccionario enciclopédico Castell, tomo 1, editorial Castell, año de publicación 1992.
- Enciclopedia estudiantil, editorial Cultural, año de publicación 2000.
- www.mbr-design-group.com

UNIDAD 3. PROPAGACIÓN DEL SONIDO Y PARÁMETROS ACÚSTICOS

Introducción.

La propagación del sonido es la raíz de donde se empieza estudiar la acústica ambiental, y la acústica de recintos (acústica arquitectónica). Es desde allí donde parte su estudio y de donde se empiezan a desglosar los distintos parámetros que en la actualidad se estudian, se miden y se diseñan. En esta unidad nos acercaremos al estudio y comprensión de los distintos parámetros acústicos empezando desde la propagación de ondas sonoras. Para poder empezar a estudiar dichos parámetros, tenemos que tener en claro los conceptos básicos del sonido y de la acústica, ya que todos ellos se encuentran implícitos en el estudio de los parámetros acústicos y la propagación del sonido.

CAPITULO 7. SONIDO AL AIRE LIBRE, LEY DEL INVERSO CUADRADO

Lección 31: Generalidades del Sonido al Aire Libre.

La propagación del sonido al aire libre es mucho más sencilla de comprender y de definir que la del sonido en un recinto, puesto que al aire libre el sonido se propaga sin llegar a chocar con ninguna superficie y sin que ningún fenómeno acústico se esté involucrando en dicha propagación, cuando emitimos un sonido al aire libre este se encarga de transportarse en un caso ideal hasta que sea absorbido por el aire o este mismo se extinga. El aire como partículas que conforman un medio gaseoso también absorben energía sonora, pero esto es una consideración a tener en cuenta para frecuencias altas, es decir el aire absorberá energía considerable en frecuencias altas a medida que las ondas sonoras se propagan.

Lo más importante de la propagación del sonido al aire libre es la ley del inverso cuadrado, esta ley nos dice que la intensidad del sonido es inversamente proporcional a la distancia, es decir que cada vez que el sonido recorra una distancia doblemente mayor a la que ya ha recorrido tendrá una caída en su intensidad de 6dB, es por eso que cuando estamos conversando con alguien si

estamos muy lejos no lo vamos a poder percibir muy bien y a medida que nos acercamos la percepción de lo que dicha persona está hablando será mayor.

La ley del inverso cuadrado es el único parámetro que a groso modo rige lo que se denomina campo sonoro libre. Y es un factor muy importante a tener en cuenta cuando diseñamos sistemas sonoros para conciertos y espectáculos en locaciones al aire libre.

Lección 32: Propagación del sonido al aire libre.

Para que pueda existir sonido como tal existen ciertas condiciones que debemos tener en cuenta, la primera es que exista un medio de propagación, un medio solido liquido o gaseoso, a diferencia de las ondas electromagnéticas el sonido necesita medio de propagación, si no hubiese medio así hubiese excitación de parte de la fuente no habría propagación. Como en el espacio exterior, no hay medio por lo tanto el sonido no se propaga, por eso es que podemos ver una estrella fugaz, que es una estrella quemándose a millones de años luz pero nunca podremos escucharla. Otra condición para que el sonido se propague es que haya excitación o vibración de alguna fuente. El medio es un ambiente sin excitar y necesita de una fuente para que dicha excitación se empiece a propagar. En nuestro planeta el medio más común es el aire, es el medio que usamos los humanos para poder comunicarnos, escuchar música, etc.

La propagación del sonido en el aire se puede comparar a la de las ondas en el agua. Las ondas se extienden uniformemente en todas las direcciones, disminuyendo en amplitud al alejarse de la fuente. En el aire, al doblarse la distancia, la amplitud se reduce a la mitad, lo cual equivale a una caída de 6 dB. Así pues, si se pasa de uno a dos metros de la fuente el nivel de la presión sonora disminuye 6 dB, a 4 m caerá 12 dB, a 8 m 18 dB, y así sucesivamente.

Sin embargo, esta ley sólo es cierta cuando en la trayectoria del sonido no hay obstáculos ni objetos reflectantes. Estas condiciones ideales se conocen por campo libre. Los parámetros sonoros que podemos definir en un campo abierto es la intensidad, La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su intensidad, que es el flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, suponiendo que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a la viscosidad, la conducción térmica u otros efectos de absorción. Por ejemplo, en un

medio perfectamente homogéneo, un sonido será nueve veces más intenso a una distancia de 100 metros que a una distancia de 300 metros. En la propagación real del sonido en la atmósfera, los cambios de propiedades físicas del aire como la temperatura, presión o humedad producen la amortiguación y dispersión de las ondas sonoras.

Lección 33: Ley del Inverso Cuadrado.

La Ley del Inverso Cuadrado es la regla que permite explicar porque el sonido se hace más débil a medida que nos alegamos de la fuente sonora. A medida que una onda se aleja de la fuente, la energía disipada por esta se expande como una esfera. Debido a que debe haber conservación de la energía, a medida que la esfera se hace mayor cada punto de esta tendrá menos energía. En la figura 20, a 1 metro de la fuente sonora, el recuadro azul contiene una determinada cantidad de energía. A 2 metros de distancia de la fuente sonora, esa misma cantidad de energía debe ser repartida en el recuadro verde de mayor tamaño, así, habrá menos energía en cada punto.

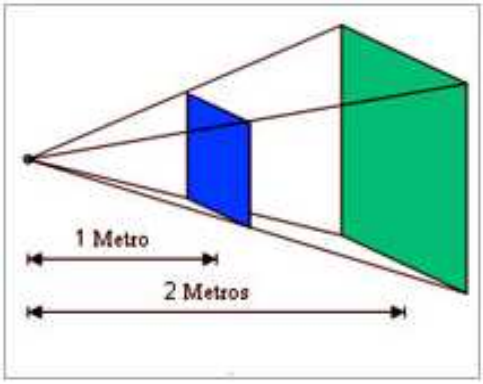

Figura 20. Ejemplo de propagación de una fuente al aire libre.

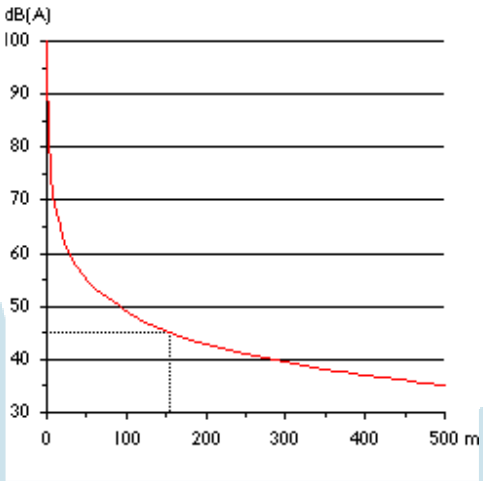

Grafico 22. Representación de una onda propagada al aire libre, intensidad vs distancia.

La energía de las ondas sonoras (y por tanto la intensidad del sonido) caerán con el cuadrado de la distancia a la fuente sonora. En otras palabras, si nos alejamos 200 metros de un aerogenerador, el nivel de sonido será un cuarto del que teníamos a 100 metros. Y así, si multiplicamos por dos su distancia hará que el nivel de dB(A) se divida por 6.

A una distancia de un diámetro de rotor de la base de un aerogenerador emitiendo 100 dB(A) generalmente tendrá un nivel de sonido de 55-60 dB(A), correspondiente a una secadora de ropa (europea). Cuatro diámetros de rotor más allá tendrá 44 dB(A), que corresponden al sonido que tendría en una tranquila sala de estar. A una distancia de 6 diámetros de rotor (260 m) tendría alrededor de 40 dB(A).

La ley del inverso cuadrado define a la intensidad como en una fuente esférica como:

$$I = P / 4\pi r^2$$

Donde P es la presión y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Y en una fuente lineal:

$$I = P / d^2$$

CAPITULO 8. SONIDO EN RECNITOS.

Lección 34: Generalidades del Sonido en Recintos.

Desde que una fuente sonora emite un sonido hasta que dicho sonido se convierte en sensación sonora para un oyente, se produce un conjunto de fenómenos divididos en dos fases: la transmisión del sonido desde la fuente hasta el oído y la audición de las ondas sonoras. La Acústica Arquitectónica es una parte de la Física que estudia lo que acontece con las ondas sonoras desde que salen del foco que las produce hasta que llegan a la audiencia: fenómenos de reflexión y refracción, absorción y difracción. Puede resumirse su importancia en la siguiente frase: las salas afectan siempre a cualquier sonido que se propague en su interior.

En locales cerrados, toda la energía de las ondas sonoras se refleja sucesivamente en las paredes, suelo y techo del local. Cada oyente percibe además del sonido directo de la fuente, aquel sonido que ha sido reflejado una o varias veces en alguna de las superficies. Este fenómeno se conoce como reverberación. Si las paredes fueran reflectores perfectos, el proceso sería de duración infinita. Las superficies reales no son reflectores perfectos y absorben parte del sonido que les llega, por lo que el proceso tiene una duración limitada.

Cuando una fuente sonora emite una señal de una gran duración, el sonido directo y las numerosas reflexiones de las ondas sonoras llegan simultáneamente al oyente, habiendo recorrido diferentes trayectorias y teniendo diferentes amplitudes.

La reverberación en una sala se caracteriza por el tiempo de reverberación T, que se define como el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya a la millonésima parte de su valor inicial. Esta magnitud depende del tamaño de la sala, de los materiales interiores y de la frecuencia. El campo sonoro en un punto de una sala es la suma del sonido directo de la fuente y del campo reverberante.

Lección 35: Propagación del Sonido en Recintos.

La propagación del sonido en recintos cerrados se ve influenciado por la presencia de las superficies que los limita. En efecto, las ondas sonoras, al chocar contra las paredes, pierden parte de su energía, al ser absorbida por ellas, reflejando el resto de energía al interior de las salas. En el caso ideal que los materiales que constituyen las paredes fuesen totalmente absorbentes, no existirían ondas reflejadas y la propagación sería similar a la que se presenta en situación de campo libre o anecoico (campo ideal sin reflexiones). Si, por el contrario, las paredes del recinto fuesen totalmente reflejantes, las ondas sonoras sufrirían una serie de reflexiones; en esta situación, se dice que el campo es reverberante.

En la práctica, las situaciones nunca son totalmente anecoicas o reverberantes, ya que siempre existe una cierta absorción acústica en los recintos. Cuando el sonido es propagado dentro de un recinto de forma continúa el campo sonoro se homogeniza (se empieza a comportar de la misma manera en todo el recinto) y se crean dos campos sonoros en el mismo instante que el sonido esta interactuando con el recinto.

El primero es el campo sonoro directo: Es el punto done el sonido que llega directamente es mayor en amplitud todavía que el que llega reflejado más no quiere decir que en este campo no llegue sonido reflejado.

El segundo es el campo sonoro reflejante o reverberante: este es el campo en donde las reflexiones de las paredes u objetos que constituyen el recinto son mayor en amplitud que el sonido directo y por lo tanto enmascaran completamente el sonido directo.

Todo recinto lo constituyen estos dos campos, la variación de estos campos dependerá solo de la posición de la fuente y es diferente para cada recinto según sus condiciones de volumen, forma geométrica y absorción de materiales que lo constituyen. Según esto podríamos pensar que cada recinto se comporta como un sistema diferente, inclusive si dijimos que la velocidad del sonido depende

directamente de la temperatura, un recinto no sonará igual a altas temperaturas que a bajas temperaturas, no variaría mucho su comportamiento pero si variará.

Existe un punto en donde el campo directo y el campo reverberante se encuentran o se cruzan es decir un punto en que el campo directo deja de enmascarar a reverberante y el reverberante empieza a enmascarar al directo, ese punto se conoce como Distancia Critica, y se define a la distancia crítica como la distancia que existe desde la fuente hasta el punto donde termina el campo directo y empieza el reverberante.

Otro factor importante que afecta los recintos son los modos de resonancia, estos modos generalmente se estudian en frecuencias bajas y son resonancias propias del recinto que se originan a partir de sus dimensiones en los tres ejes (x, y, z) del recinto. Según su eje se denominan Axiales, Tangenciales u oblicuos, son fáciles de identificar mas no son fáciles de controlar por medio de control acústico ya que dependen directamente de la geometría del recinto, pero conocer su procedencia hace tenerlos en cuenta a la hora de hacer un diseño de un recinto.

Para poder estudiar el sonido en los recintos hay que tener tres criterios:

- Las frecuencias bajas el estudio de propagación dentro de ellas será sobre los modos normales de resonancia.
- Las frecuencias medias se estudiaran con difusión y absorción.
- Y las frecuencias altas la teoría de estudio de ellas será estadística (por la cantidad) y su estudio será de difusión y reflexión.

Lección 36: Modos de resonancia.

La teoría de modos analiza la presencia de un fenómeno común en los recintos. Estas teorías, de aplicación incierta en salas de gran volumen, debido a la complejidad de problemas adicionales que presentan, se aplican con éxito en recintos pequeños de formas geométricas regulares.

Es decir que, el comportamiento modal vinculado con las formas y dimensiones de salas de 200 a 500 personas, estudios de grabaciones, cuartos de control, etc. Se pueden predecir y eventualmente corregir.

Se verifica que, entre dos puntos de una sala, el sonido no se trasmite en forma continua con una respuesta plana perfecta. La respuesta acústica del recinto se presenta en paquetes de frecuencias. Una medición de esta dará una curva así.

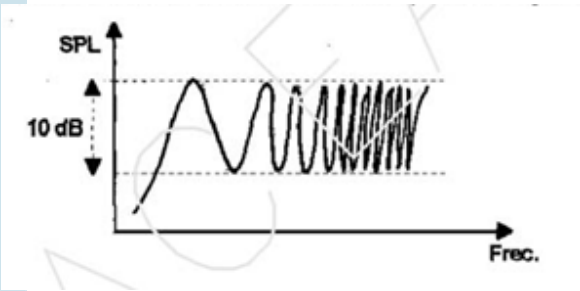

Grafico 23. Respuesta en frecuencia de una sala.

Es normal que en cada pocos ciclos, aparezcan picos y valles con excursiones de 10 dBs o mas, que irán aumentando en densidad a medida que se incrementa la frecuencia.

Una posible solución para modificar este comportamiento seria tratar la totalidad de superficies del recinto con materiales absorbentes, al fin de recrear un campo con características de campo libre. Subjetivamente estaríamos perdiendo una cualidad fundamental del oído, tal es la placentera sensación de percibir un campo reverberante.

Debemos por lo tanto analizar e intentar corregir estas variaciones. Si máximos y mínimos de la figura se hallan razonablemente juntos, es decir con Δf pequeños, el oído no los alcanzara a percibir y los interpretara como una buena respuesta.

Entre dos paredes paralelas, hecho muy común en recintos pequeños, el sonido ya viene y va por múltiples reflexiones, por lo que es factible que se produzcan ondas estacionarias.

Si la separación entre paredes coincide con ʎ/2 de una determinada frecuencia, resultará un recorrido total de un ʎ completo, produciéndose un pico de resonancia que reforzara esa frecuencia en particular.

Considerando que un recinto posee, como mínimo, seis superficies, este efecto se repetirá para todas las combinaciones posibles de ellas y para aquellas distancias que coincidan con valores de ʎ, 2ʎ, 3ʎ, etc.

Si pensamos que gran cantidad de recintos, tienen formas equivalentes a paralelepípedos rectangulares, estos refuerzos ocurrirán a tres frecuencias básicas correlacionadas con sus dimensiones (alto, largo y ancho) más sus múltiplos, más los infinitos caminos posibles involucrados con reflexiones que retornen a su origen.

Por otra parte, las frecuencias inferiores a los 200Hz, excitaran al recinto en sus modos naturales de resonancia, magnificado la percepción de las mismas en detrimento de aquellas donde no existan modos. La razón es que en términos de longitud de onda, los recintos chicos son acústicamente pequeños para frecuencias bajas y grandes para altas. En el rango de bajas frecuencias, existen tres tipos de modos de resonancia:

Modos axiales: son aquellos que involucran reflexiones sobre dos superficies vinculadas con las tres dimensiones principales del recinto (ancho, largo y alto), estableciéndose a partir de dos ondas que se propagan en forma paralela a cada unos de los ejes. Estos modos son los más importantes y fáciles de predecir dado que su longitud de onda será la mitad de las tres dimensiones principales.

Modos Tangenciales: Son aquellos vinculados con las reflexiones sobre dos paredes de superficies opuestas, por lo que involucran cuatro superficies opuestas con un total de cuatro ondas. En cada reflexión, perderán parte de su energía debido a la absorción, por lo que tendrán menor peso que los axiales (3dB).

Modos Oblicuos: son aquellos vinculados con las reflexiones sobre las seis superficies del recinto con un total de ocho ondas en el trayecto por o que tendrán menor peso aun que las axiales. (3dB). Estos modos se generan a frecuencias más altas que el menor modo axial.

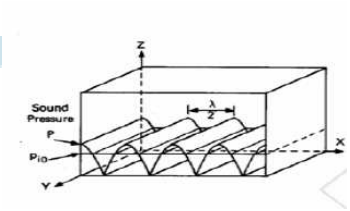

Figura 21. Modos Axiales.

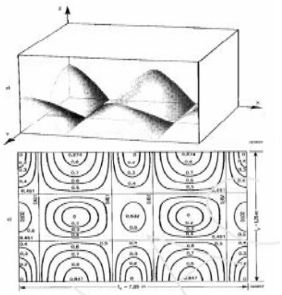

Figura 22. Modos Tangenciales.

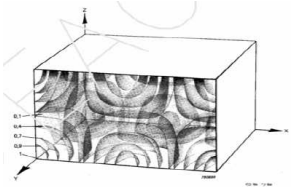

Figura 23. Modos Oblicuos.

La siguiente es la expresión matemática que vincula todos los modos posibles.

$$F = V_S/2\sqrt{p^2/L^2 + q^2/W^2 + r^2/H^2}$$

Donde: F= Frecuencia del modo (Hz)

Vs=Velocidad del Sonido (m/s)

p, q, r = números enteros positivos vinculados a las tres dimensiones.

L= largo del recinto (m)

W= ancho del recinto (m) H=altura del recinto (m)

Lección 37: Distancia Crítica.

La distancia en la cual el nivel de presión sonora de los campos directo y reverberante son iguales. Es decir el punto en el espacio donde amplitud de un eco reflejado está igual que el de la fuente.

Esta distancia es dependiente en la geometría y absorción del espacio en el cual las ondas acústicas se propagan, tan bien como de las dimensiones y la forma de la fuente sonora.

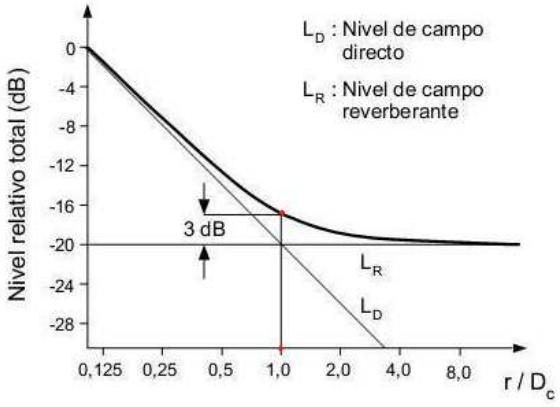

Grafico 24. Distancia Crítica.

CAPITULO 9 PARAMETROS ACUSTICOS.

Lección 38: Generalidades de los Parámetros acústicos.

Parámetros acústicos, son parámetros que definen la acústica de un recinto o un espacio, todos son medibles y cuantificables, algunos son para el ser humano subjetivos y otros no. En este capítulo veremos los parámetros acústicos más utilizados en la caracterización de recintos. Estos parámetros son los que conllevan a establecer diseños y tratamientos acústicos en la acústica arquitectónica, y de el control de cada uno de ellos depende que los recintos suenen bien o no, recordemos que todos los recintos no son hechos para las mismas aplicaciones, no es lo mismo un auditorio para conferencias que una sala de concierto para música clásica, ellos variarían según su finalidad.

Los parámetros que veremos en este capítulo son:

- Tiempo de Reverberación Rt 60
- Sonoridad G
- Claridad C
- Nivel de inteligibilidad NI
- Nivel continuo equivalente Leq

Existen otra cantidad de parámetros acústicos que también son medibles y cuantificables pero debido a que profundizan la acústica en su estudio y comprensión no los veremos pero si los nombró a continuación.

- Tiempo de caída Temprana EDT
- Nivel Constante Expresado SEL.
- Clima de ruido NC
- Correlación Cruzada Interanual IACC
- Fracción de energía lateral LF
- Ventana Inicial de Retardo De tiempo ITDG
- Tiempo Central TS
- Intimidad.

- Índice de Transmisión del Discurso STI.
- Sonoridad o Nivel Sonoro Total G.

Lección 39: Tiempo de Reverberación y Coeficiente de absorción.

El tiempo que tarda en hacerse inaudible el sonido en una sala, depende de su intensidad. Para poder hacer comparaciones entre sonidos diferentes, es necesario definir una magnitud que no dependa de su intensidad inicial. Se define el tiempo de reverberación como el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya a la millonésima parte de su valor inicial o, lo que es lo mismo, que el nivel de intensidad acústica disminuya 60 decibelios por debajo del valor inicial del sonido. Por ejemplo, el tiempo de reverberación del teatro de la Scala de Milán es de 1.2 s y el de la Catedral de Colonia es de 13 s.

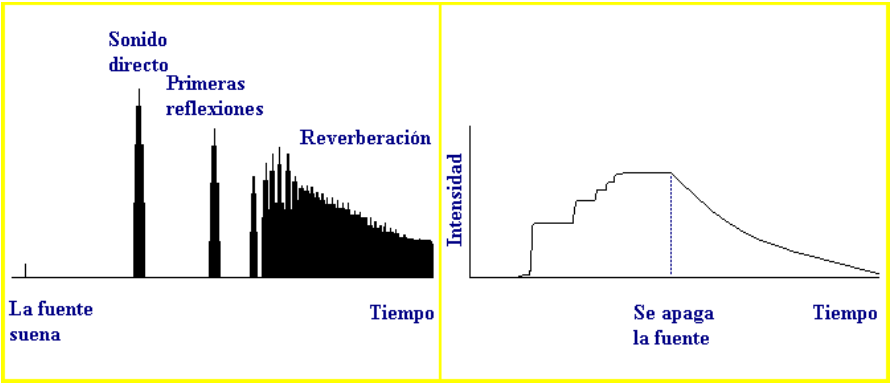

Grafico 25. Representación grafica del Tiempo de Reverberación.

El físico Wallace Clement Sabine desarrolló una fórmula para calcular el tiempo de reverberación (TR) de un recinto en el que el material absorbente está distribuido de forma uniforme. Consiste en relacionar el volumen de la sala (V), la superficie del recinto (A) y la absorción total (a) con el tiempo que tarda el sonido en disminuir 60 dB en intensidad, a partir de que se apaga la fuente sonora.

$$TR = \frac{0,161V}{Aa}$$

Hay que tener en cuenta que la fórmula de Sabine no es la única, ni es absolutamente fiable. Sólo se trata de una de las fórmulas más utilizadas. Cuando

los ingenieros encargados del acondicionamiento acústico la usan, lo hacen sólo a modo de orientación.

Otras de las fórmulas empleadas son la fórmula de Eyring y la fórmula de Millington.

Las aplicaciones o usos que se van a dar a una sala, determinan su tiempo de reverberación ideal. Así, salas con tiempos bajos o "secas" pueden ser aptas para teatro y/o palabra hablada, pero poco adecuadas para la audición de música. Al mismo tiempo, diversos géneros de música exigen diferentes tiempos, en general mucho mayores que el considerado óptimo para la palabra. Todo esto hace muy difícil encontrar salas polivalentes, aunque mediante diversas técnicas es posible "afinar" una sala o variar su tiempo de reverberación.

El volumen de una sala determina directamente (junto a otros factores como los materiales de la misma) el tiempo de reverberación. El tiempo óptimo es una función del volumen, y generalmente se prefieren tiempos óptimos mayores cuando las salas son más grandes, y viceversa. De manera empírica se consideran tiempos óptimos en relación con el uso de una sala, los siguientes:

Uso de la sala	**T_{60} (s)**
Teatro y palabra hablada	0.4 - 1
Música de cámara	1 - 1.4
Música orquestal	1.5
Ópera	1.6 - 1.8

Música coral y sacra	hasta 2.3

Tabla 4. Tiempo de Reverberación recomendado para distintas salas.

Coeficiente de Absorción.

El coeficiente de absorción o de atenuación se define como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente por una superficie o sustancia. Normalmente, se expresa en Sabines dentro de una escala de 0 a 1. Se define por la letra alfa **α**

Como este valor variará para cada frecuencia, no se puede hablar de un coeficiente único. El coeficiente de absorción hay que tenerlo en cuenta a la hora de acondicionar acústicamente una sala con materiales que absorban el sonido, tanto en lo referente al interior, como a su aislamiento del exterior.

Lección 40: Sonoridad (G).

Es el grado de amplificación producido por la sala. Este depende de la distancia del receptor a la fuente, de la energía de las primeras reflexiones, de la superficie ocupada por el público y de la reverberación.

Se cuantifica mediante el parámetro Strength Factor. G. Que se define como la diferencia entre el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional (fuente que irradia energía en todas las direcciones, dodecaedro) en un punto del recinto y el SPL Producido por la misma fuente situada en campo libre y medida a 10mt de distancia.

$$Gmid = \frac{G500hz + G1000hz}{2}$$

El valor recomendado para una sala vacía debe estar entre 4 y 5,5 dBs.

Lección 41: Claridad (C).

La claridad es un parámetro acústico subjetivo y se divide en 2, la claridad de la voz conocida como C50 y la claridad musical conocida como C80.

Claridad de la Voz (C50)

Es la relación entre la energía que llega al receptor en los primeros 50 ms a partir de la llegada del sonido directo y la energía sonora que llega pasados 50ms. La media aritmética promediada de 500hz a 4khz (4000hz) se conoce como claridad C50.

C50= (0,25xC50500hz) + (0,25xC501000hz) + (0,25xC502000hz) + (0,25xC504000hz).

Cuanto más elevado sea el valor del C50 mayor es el grado de inteligibilidad y de sonoridad del recinto. El valor recomendado para una buena sonoridad de la voz C50 con el recinto ocupado es de mayor a 2 dBs.

Claridad Musical (C80).

Es la relación entre la energía que llega al receptor en los primeros 80 ms a partir del sonido directo y la energía que llega pasados 80ms. Indica el grado de separación de los diferentes sonidos de una ejecución musical, la medida aritmética entre 500 y 2000 Hz se conoce como claridad musical C80.

$$C80= \frac{C500hz+C1000hz+C2000hz}{3}$$

Lección 42: Inteligibilidad.

La inteligibilidad es una respuesta subjetiva, por lo que se puede medir examinando el número de palabras, fonéticamente sin sentido, correctamente anotadas por un equipo de oyentes previamente distribuidos en la sala

La relación existente entre la inteligibilidad de una sala y su tiempo de reverberación, determina en definitiva la calidad acústica de la misma, ya sea esta sala utilizada para conferencias o bien para el aprendizaje y la interpretación musical. La inteligibilidad es el nivel de entendimiento de la palabra.

La inteligibilidad se mide a través del índice de articulación, que indica el porcentaje de aciertos en la comprensión de una cantidad de emisiones vocales. Hay tres tipos de índices: el índice de articulación silábico, en el que se hace escuchar al sujeto cierta cantidad de sílabas sueltas sin sentido, el índice de articulación de palabras, para el cual se utilizan palabras en general de dos sílabas, y el índice de articulación de frases, que utiliza frases completas. En todos los casos las emisiones son fonéticamente balanceadas, es decir, los fonemas aparecen en la misma proporción que en el habla normal.

Se observa que a partir de 35 a 40 dBA de ruido ambiente los índices de articulación empiezan a disminuir. También se observa que el índice silábico es menor que el de palabras y éste que el de frases. Es decir, en una condición dada, se entienden más las frases completas que las palabras o las sílabas sueltas. Esto se debe a que la variedad de sílabas sueltas es mucho mayor que la de palabras o frases. Virtualmente cualquier combinación de consonantes y vocales da una sílaba válida, pero no cualquier combinación de sílabas es una palabra válida. Por ejemplo, “caza” podría confundirse con “cafa”, pero como ésta no es una palabra válida, el sujeto se decide por “caza”. Análogamente, no toda combinación de

palabras de una frase correcta, tanto en su sintaxis como en su sentido. Al decir "ese hombre caza conejos", la palabra "caza" podría confundirse con "casa", "caja", "cafa", "taza", "tasa", "tafa", etc. Sin embargo, la única palabra válida y que da sentido a la frase es "caza".

Lección 43: Nivel Continuo Equivalente Leq.

La gran mayoría de los ruidos en los lugares de trabajo tienen niveles de presión acústica variables. Lo que se pretende con el Leq, es poder asignar al ruido variable un único valor que refleje el nivel de un ruido constante que tuviese la misma energía que el ruido variable en el período de tiempo estudiado.

Para saber qué nivel de ruido tenemos presente en un recinto, es necesario conocer el nivel sonoro equivalente existente en ese lugar, porque es el descriptor de ruido más utilizado por las normas y leyes, al promediar la energía sonora variable durante el tiempo de análisis. Es la base de otros indicadores de ruido.

Se define como el nivel sonoro medido en dB(A) de un ruido supuesto constante y continuo durante toda la jornada, cuya energía después de atravesar la red A sea igual a la correspondiente al ruido variable a lo largo de la jornada. Se expresa:

$$Leq = 10\log_{10}\frac{\frac{1}{T}\int_0^T p_A^2(t)dt}{P_{ref}^2}$$

donde pA(t) es la salida de la red de ponderación A, es decir, que corresponde a la presión p(t) filtrada por la red A, Pref es 20uPa que es el nivel de referencia para presión sonora en el aire. El tiempo T puede ser la duración de una jornada de trabajo, o bien una semana, en caso de que las tareas o actividades varíen de un día a otro.

Si fuera posible subdividir el tiempo T en intervalos Ti en los que el ruido pueda considerarse de nivel aproximadamente constante (por ejemplo cuando la actividad durante la jornada se compone de diversas tareas cada una con su ruido asociado), la integral se puede reemplazar por una suma:

$$Leq = 10\log_{10}\frac{\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} p_{Ai}^{2} T_i}{P_{ref}^{2}} = 10\log_{10}\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}\frac{p_{Ai}^{2}}{P_{ref}^{2}} T_i$$

Quedando

$$Leq = 10\log_{10}\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} T_i$$

Fuentes Documentales de la Unidad 3

- Acústica y Sistemas de Sonido, Ing. Federico Miyara. 1999.
- Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrot Isbert, 1998.
- Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía, Ángel Luis León Rodríguez, 2007.

UNIDAD 4. MATERIALES, ACONDICIONAMIENTO Y SIMULACION ACÚSTICA.

CAPITULO 10 MATERIALES ACÚSTICOS.

Introducción.

La mayor área de desempeño de la acústica en Colombia, es la acústica arquitectónica, en esta unidad veremos factores de vital importancia para la acústica arquitectónica; como materiales acústicos más utilizados en los distintos acondicionamientos y diseños acústicos, y las técnicas de predicción que se utilizan para llevar acabo tratamientos acústicos en recintos.

Lección 44: Generalidades de los materiales acústicos.

En una construcción moderna, el uso de materiales acústicos es fundamental para el buen funcionamiento de los espacios. Generalmente se realizan actividades que general ruidos (o sonidos, según la sensibilidad auditiva de las personas) que deben ser absorbidos de manera adecuada para evitar reflexión excesiva. A partir de especificaciones ambientales, se deben escoger los materiales necesarios para la determinar un valor particular de absorción. Para cerrar un ciclo acústico ideal se debe analizar globalmente el resultado deseado. En este instante debemos clasificar los elementos que proporcionarán la acústica referida, tales como: pisos, revestimientos de muros y ventanas, mobiliario, vegetación, sistemas de oficina abierta.

Para ejercer correctamente el control acústico en recintos, y la insonorización se hace necesario utilizar materiales específicamente diseñados para frecuencias específicas que en su momento, absorberán, reflejaran, o dispersaran la energía sonora según lo requiera el caso. Estos materiales se pueden convertir en dispositivos comerciales o los podemos diseñar para casos específicos. En este capítulo veremos cada uno de esos materiales y aprenderemos a calcularlos y a

utilizarlos, recuerden que para lograr un buen audio es necesaria una buena acústica.

Figura 24. Esquema de un estudio de grabación.

Lección 45: Resonadores de membrana.

Estos sistemas se basan en el hecho de que una onda acústica es parcialmente absorbida cuando encuentra en su camino cuerpos capaces de vibrar a su propio ritmo. Si el cuerpo que se encuentra tiene unos modos de vibración discretos, absorbe solo algunas de las frecuencias y por tanto la absorción es selectiva. Como el panel tiene inercia y amortiguamiento, parte de la energía sonora incidente se convierte en energía mecánica y se disipa en forma de calor por eso absorbe sonido. Pero al entrar el panel en vibración, él mismo actúa como un radiador sonoro por lo que en estos sistemas el coeficiente de absorción no es superior a 0.5

Estos materiales tienen ventaja respecto a los porosos en aspectos como la resistencia a los golpes, duración y posibilidad de tratar o redecorar la superficie, pueden barnizarse, pulirse o pintarse.

Son idóneos para crear un recinto con un campo sonoro más difuso ya que una onda plana que se refleja desde una superficie vibrante pierde sus propiedades direccionales.

Las principales características de estos materiales son:

La variación del coeficiente de absorción con la frecuencia de un sistema vibratorio rígido se representa en forma de una curva de resonancia.

La capacidad de absorción depende de la elasticidad de los materiales, así como de su peso específico, dimensiones y del procedimiento de sujeción de los paneles, así como de su posición relativa respecto a la pared rígida y del relleno de los espacios entre el sistema y la pared.

El amortiguamiento de los bordes de los paneles y relleno de los huecos con materiales blandos, produce un aumento del coeficiente de absorción y un cambio hacia la zona de las bajas frecuencias del valor máximo del coeficiente de absorción.

Calculo de un resonador de Membrana:

Figura 25. Resonador de Membrana puesto sobre un muro.

Donde se cumple que:

$$f_{res} = \frac{6000}{\sqrt{md}}$$

Donde m es la masa en Kg de la Lámina y d es la Distancia.

Figura 26. Resonador de Membrana.

Lección 46: Trampa de Graves.

Uno de los problemas comunes al momento de grabar y mezclar es el problema de los bajos, producidos por los cuartos sin un buen tratamiento acústico. Si descubres que tienes ondas permanentes en tu espacio de grabación, hay algunas cosas que puedes hacer para combatir ese fenómeno acústico. Las compañías, como Auralex y otras más, hacen sistemas de tratamientos acústicos para cada situación.

Sin embargo, el producto que querrás obtener primero es la trampa bajos. Las trampas de bajos o Bass traps en ingles, están diseñadas para capturar las frecuencias bajas que se producen en tu espacio de monitoreo y grabación.

Acabar con cada problema de audio en un cuarto de mezclas de una sola vez, puede ser complicado, sobre todo si no se tiene mucha experiencia, tiempo y

dinero, pero los dos puntos principales para el tratamiento de bajos deberían ser las esquinas detrás de ti cuando te sientas delante de tus monitores.

Figura 27. Trampa de Graves Auralex (unidad comercial).

Lección 47: Difusores.

Son elementos que se acoplan a los paramentos del recinto (control, salas, escenario, locutorio, etc.) con el fin de mejorar la difusión,

Al contrario que un paramento liso que actúa como un espejo generando una imagen sonora muy parecida a la original pero con el correspondiente retraso (delay) que falsea la escucha real del evento sonoro, en el caso de los difusores esta reflexión no es especular sino "pulverizada" lo que ofrece una imagen sonora rica y que no interfiere con la primera escucha de la señal, es decir genera espacio tras de ella.

Los difusores tienen el efecto en los recintos de definir mejor los sonidos y generar más espacio. Los difusores pueden ser de varios tipos:

- Convexos
- Residuales cuadráticos (QRD)
- Birradiales
- Perforados

Asimismo se asocian para formar combinaciones de tipos. Los difusores permiten oír mucho mejor al salvar las interferencias de las primeras reflexiones (<20 mS) cosa que no se puede conseguir de ninguna otra manera.

Convexos. Una superficie convexa (cilíndrica) refleja un frente de ondas de forma divergente por lo que es un difusor natural. El campo de difusión es perpendicular al eje del cilindro.

Ideales para rincones, evitando el efecto rincón y haciendo a la vez una trampa de graves.

Figura 28. Difusor Convexo.

El espesor de esta superficie afectará a la gama de bajas frecuencias difundidas.

Residuos Cuadráticos QRD. QRD es la abreviatura de Difusor de Residuo Cuadrático, genera un campo de difusión en el sentido perpendicular a las lamas o canales. Su frecuencia mínima es dada por la profundidad de los canales y su frecuencia máxima por la anchura de estos.

Figura 29. Difusor QRD.

Su construcción suele ser en MDF (DM) aunque se pueden hacer en madera maciza, metacrilato, vidrio, escayola, mármol, etc. Se utilizan sobre todo en paredes traseras de controles y donde se precise aumentar la difusión como escenarios, locutorios, platós y salas de grabación.

Difusores Acústicos Birradiales. Son una combinación de dos difusores QRD a 90 grados de cruce, lo cual le da un campo de difusión semiesférico. Ideales para techos y zonas de campo de difusión muy anchas.

Su frecuencia mínima es dada por la mayor profundidad y la máxima por la menor distancia entre celdas, se pueden hacer fractales (micro difusores dentro de las celdas)

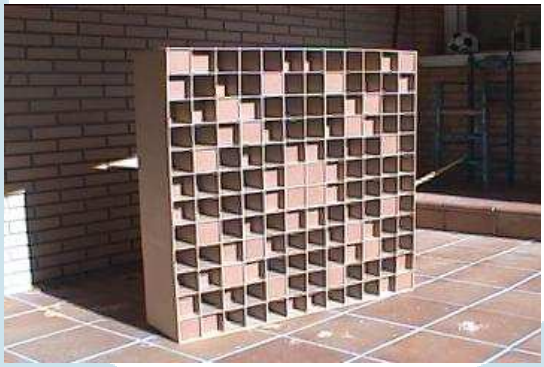

Figura 30. Difusor Birradial (Dos dimensiones).

Difusores Acústicos Perforados. Una superficie reflexiva pero perforada a otra interna absorbente, resulta ser difusora al encontrar el sonido incidente diferentes impedancias a la reflexión, que alteran el ángulo de fase, lo que le hace comportarse como difusor y al estar perforado actúa además como resonador de medias frecuencias.

Figura 31. Difusores Perforados (Pared del Fondo).

Lección 48: Materiales Fono absorbentes.

Son materiales generalmente porosos, cuya función consiste en atenuar el sonido a un rango de frecuencias específico. Se usan para el aislamiento y el control acústico de los recintos.

Este tipo de materiales son unos de los más usados, ya que se permiten instalar en pisos, paredes, cielo rasos y que las unidades que se encuentran en el comercio son bastantes, de distintas especificaciones y precios.

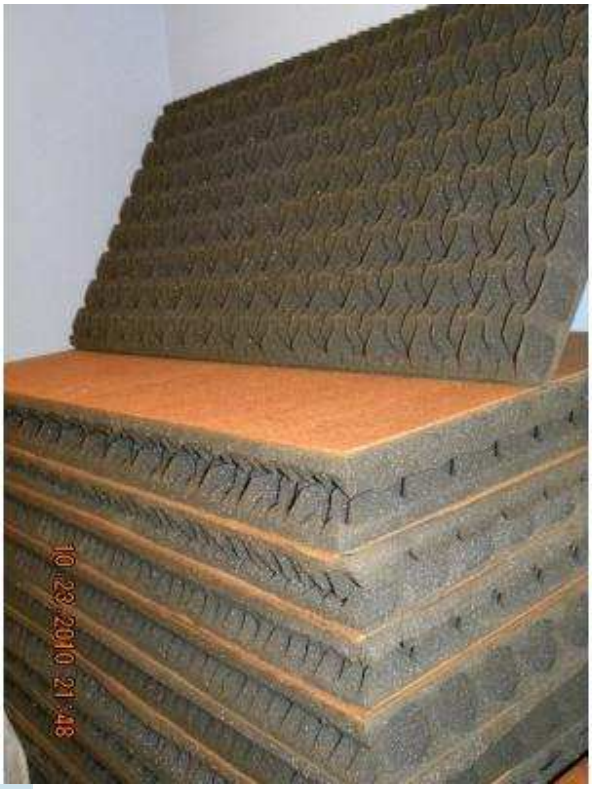

Figura 32. Material Fono Absorbente.

CAPITULO 11 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

Lección 49: Generalidades del Acondicionamiento Acústico

La finalidad de acondicionar acústicamente un determinado recinto (cerrado o al aire libre) es lograr que el sonido proveniente de una fuente o fuentes sea irradiado por igual en todas direcciones logrando un campo sonoro difuso ideal.

Esta uniformidad no siempre se consigue y la acústica arquitectónica, intenta aproximarse al máximo a este ideal a través de ciertas técnicas que aprovechan

las cualidades de absorción, reflexión y difusión de los materiales constructivos de techos, paredes y suelos y de los objetos u otros elementos presentes en el recinto. De hecho, cosas tan aparentemente triviales como la colocación o eliminación de una moqueta, una cortina o un panel, son cruciales y pueden cambiar las condiciones acústicas de un recinto.

La principal herramienta con que cuentan los técnicos encargados del acondicionamiento acústico de un determinado local/lugar es conocer el tiempo de reverberación específico, que se calcula utilizando diversas fórmulas. La reverberación debe ser inferior a los 2 segundos.

El tiempo de reverberación, para que sea útil, se ha de calcular en función de una determinada frecuencia, dado que depende del coeficiente de absorción de los materiales utilizados y este coeficiente depende a su vez de la frecuencia.

Las frecuencias de trabajo más utilizadas son 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. De no especificarse la frecuencia, se toma por defecto la de 500 Hz, por ser la empleada por Sabine.

Dentro de los recintos cerrados, es fundamental conseguir un equilibrio adecuado entre el sonido directo y el campo sonoro reverberante. Por ello, un adecuado acondicionamiento acústico implica que las ondas reflejadas sean las menos posibles, por lo que desempeña un papel la capacidad de absorción de los materiales absorbentes que minimizaran las reverberaciones indeseadas o ecos que pueden dificultar la ininteligibilidad de la comunicación sonora.

Lección 50: Aislamiento e insonorización.

Insonorizar un recinto supone aislarlo acústicamente del exterior, lo cual implica una doble dirección:

1. Evitar que el sonido que producimos salga al exterior (evitar la contaminación acústica)

2. Evitar que el ruido exterior penetre y distorsione el sonido de la sala.

Es interesante tener en cuenta que si se reduce el nivel de ruido en un ambiente, también se reduce en los ambientes vecinos, aunque no mejore el aislamiento en sí. A la hora de insonorizar, hay que diferenciar entre aislamiento acústico y acondicionamiento acústico para utilizar los materiales y técnicas adecuados en cada caso:

El aislamiento acústico permite proporcionar una protección al recinto contra la penetración del ruido. En cambio, el acondicionamiento acústico lo que pretende es mejorar la propia acústica del recinto, controlando parámetros como la naturaleza y número de las reflexiones sonoras, resonancias modales, el tiempo de reverberación, etc.

La idea de Insonorizar un recinto o una locación dada debe suponer un principio físico básico, el sonido es energía, si queremos que esa energía sonora se disipe antes de atravesar una pared y seguir propagándose; debemos pensar en transducir esa energía en calor, la mejor manera de lograr que la energía sonora se vuelva calor es pasándola por una cantidad de masa grande, de tal forma que antes de que la onda logra pasar al otro lado se convierta en calor, en ese sentido la idea principal al insonorizar es muros gruesos con materiales pesados. Esa es la idea principal.

Aislar supone impedir que un sonido penetre en un medio o que salga de él. Por ello, para aislar, se usan tanto materiales absorbentes, como materiales aislantes. Al incidir la onda acústica sobre un elemento constructivo, una parte de la energía se refleja, otra se absorbe y otra se transmite al otro lado. El aislamiento que ofrece el elemento es la diferencia entre la energía incidente y la energía trasmitida, es decir, equivale a la suma de la parte reflejada y la parte absorbida. Existen diversos factores básicos que intervienen en la consecución de un buen aislamiento acústico:

Factor másico. El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: a mayor masa, mayor resistencia opone al choque de la onda sonora y mayor es la atenuación. Por esta razón, no conviene hablar de

aislantes acústicos específicos, puesto que son los materiales normales y no como ocurre con el aislamiento térmico.

Factor multicapa. Cuando se trata de elementos constructivos constituidos por varias capas, una disposición adecuada de ellas puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que la suma del aislamiento individual de cada capa, pudiera alcanzar. Cada elemento o capa tiene una frecuencia de resonancia que depende del material que lo compone y de su espesor. Si el sonido (o ruido) que llega al elemento tiene esa frecuencia producirá la resonancia y al vibrar el elemento, producirá sonido que se sumará al transmitido. Por ello, si se disponen dos capas del mismo material y distinto espesor, y que por lo tanto tendrán distinta frecuencia de resonancia, la frecuencia que deje pasar en exceso la primera capa, será absorbida por la segunda.

Factor de disipación. También mejora el aislamiento si se dispone entre las dos capas un material absorbente. Estos materiales suelen ser de poca densidad (30 kg/m3 - 70 kg/m3) y con gran cantidad de poros y se colocan normalmente porque además suelen ser también buenos aislantes térmicos. Así, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos tabiques paralelos mejora el aislamiento que ofrecerían dichos tabiques por sí solos. Un buen ejemplo de material absorbente es la lana de roca, actualmente el más utilizado en este tipo de construcciones.

La reflexión del sonido puede atenuarse también colocando una capa de material absorbente en los paramentos de los elementos constructivos, aunque estas técnicas pertenecen más propiamente al ámbito de la acústica.

Los materiales que podemos encontrar para realizar el aislamiento acústico pueden ser:

- El plomo es el mejor aislante de todos ya que aísla del sonido y de las vibraciones. Sin embargo actualmente está prohibido su utilización, por que se

utilizan láminas pesadas y flexibles fabricadas a base de caucho, betún, alfalto, EPDM, etc.

- Los materiales usados generalmente en la construcción como hormigón, terrazo, acero, etc. son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser buenos aislantes.
- También actúan como un gran y eficaz aislante acústico, las cámaras de aire (un espacio de aire hermético) entre paredes. Si se agrega, además, material absorbente en el espacio entre los tabiques (por ejemplo, celulosa, lana de roca o lana de vidrio), el aislamiento mejora todavía más. Para un efectivo aislamiento acústico, también es importante la densidad del material absorbente instalado en la cámara.
- El caucho y los elastómeros son materiales capaces de amortiguar el sonido.

Lección 51: Perdida por Transmisión.

Más interesante que el coeficiente de transmisión como medida del aislamiento acústico de los materiales, es la diferencia entre los niveles de intensidad de las ondas incidentes y transmitida. Esta diferencia se llama Pérdida por Transmisión, R, y está relacionado con el coeficiente de transmisión, por la expresión:

$$R = 10\log\frac{1}{\tau}$$

En la práctica interesa conocer el aislamiento acústico que ofrecen los distintos materiales para las frecuencias audibles. Un esquema simplificado de la variación de la Pérdida por Transmisión con la frecuencia para paredes simples se presenta en el Grafico 26.

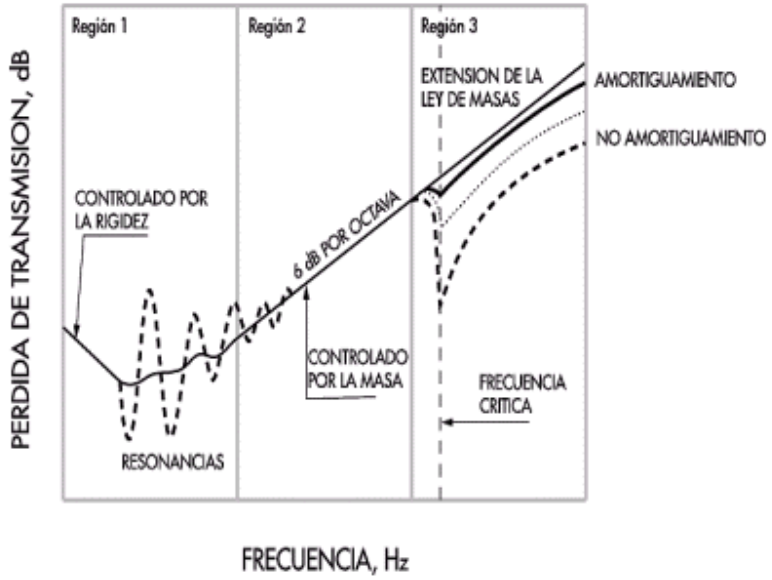

Grafico 26. Perdida de Por transmisión de una Pared Simple.

Pueden distinguirse tres zonas:

a) Región 1: a bajas frecuencias la pérdida por transmisión está controlada por la rigidez del panel, que origina que éste se comporte como una membrana, presentando una serie de frecuencias naturales de resonancia para las cuales disminuye la pérdida por transmisión.

b) Región 2: el movimiento del panel está controlado por la masa del mismo. Matemáticamente, la pérdida por transmisión de esta región puede calcularse, para un ángulo de incidencia de las ondas sonoras, por la expresión:

$$R_0 = 10\log[1+[\frac{\omega m}{2\rho c}\cos\Theta]^2]]$$

Donde:

m= masa superficial del panel, en Kg/m2.

f = la frecuencia de la onda incidente.

r = densidad del aire, en Kg/m3.

c = velocidad del sonido en el aire, en m/s.

Para incidencia normal la ecuación anterior puede escribirse:

A efectos prácticos esta expresión puede aproximarse, con suficiente exactitud, por:

$$R0 = 20 \log mf - 43$$

Lección 52: Tratamiento acústico.

El tratamiento acústico necesario para un recinto depende también de la función de dicho recinto. El tratamiento acústico tiene por objetivo general lograr una distribución uniforme del sonido dentro de un recinto. La distribución uniforme refiere tanto a la intensidad como al rango de frecuencias de los sonidos.

Los recintos son la interface entre una fuente de sonido, sea natural o electrónica, y nuestro oído.

La respuesta de un recinto al sonido se ha estudiado desde tiempos inmemoriales. Pero los avances más significativos se dieron en la primera mitad del siglo XX destacándose los trabajos de W. Sabine, R. Bolt, V. Knudsen y F. Hunt que, en los años '40, definieron matemáticamente el comportamiento de recintos estimulados por ondas.

Los recintos se dividen en pequeños y regulares y grandes e irregulares. En los primeros el tratamiento matemático es exacto, las frecuencias de resonancia y las constantes de amortiguación pueden conocerse con total certeza. En los segundos la complejidad geométrica se traduce en una explosión combinatoria de ecuaciones a resolver, la matemática se vuelve intratable y se apela a cálculos estadísticos a fin de obtener valores promedio que faciliten su análisis. En los recintos grandes e irregulares aparece el concepto de "campo sonoro difuso".

El objetivo del "tratamiento acústico de recintos" es modificar la respuesta del recinto al estímulo de ondas sonoras en un sentido conveniente. Los parámetros que se controlan con el tratamiento acústico de recintos son: el tiempo de reverberación, el grado de difusión y, en alguna medida, la respuesta en frecuencia.

Los elementos que intervienen en el tratamiento acústico de un recinto son: los paneles absorbentes, los paneles difusores, los paneles reflectores y los resonadores. Estos elementos diseñados y colocados de manera convenientes permiten obtener el recinto buscado.

Acústica variable:

Si un recinto está destinado a la música orquestal debe tener un tiempo óptimo de reverberación entre 0.8 y 1 segundo pero si está destinado a música coral este tiempo se ubica entre 1.3 y 1.5 segundos. Un recinto flexible, adaptable a todo tipo de música, requiere un sistema que permita variar su acústica. Un sistema de acústica variable, entonces, permitirá variar los parámetros del recinto, tiempo de

reverberación, difusión, etc., para todos los requerimientos posibles, logrando así un recinto altamente flexible.

La variación de la acústica de un recinto se consigue mediante paneles móviles, pueden ser rotativos, plegables o deslizables.

Lección 53: Acústica Arquitectónica.

La acústica arquitectónica es una rama de la acústica aplicada a la arquitectura, que estudia el control acústico en locales y edificios, bien sea para lograr un adecuado aislamiento acústico entre diferentes recintos, o para mejorar el acondicionamiento acústico en el interior de locales. La acústica arquitectónica

estudia el control del sonido en lugares abiertos (al aire libre) o en espacios cerrados.

La acústica arquitectónica en la Antigüedad

Los escritos más antiguos que se conocen sobre acústica arquitectónica datan del siglo I a. C., más concretamente, el año 25 a. C. y se deben a Marco Vitrubio Polio, ingeniero militar de Julio César. En estos escritos describen varios diseños para mejorar la acústica de los antiguos teatros romanos. Por ejemplo, se utilizaban vasijas de bronce afinadas que actuaban como resonadores, bajos o agudos. Aunque la vasijas servían para redirigir el sonido en una dirección diferente a la inicial, no lo reforzaban.

En las iglesias cristianas, de bóvedas altas, con muchos problemas acústicos, sobre el púlpito se colocaba un tornavoz, especie de marquesina, que evitaba que el sonido de la voz del predicador se perdiese por las bóvedas. Se consiguieron resultados muy notables.

Hasta el siglo XIX, el diseño acústico era puramente práctico y consistía, principalmente, en imitar disposiciones de salas existentes en las que la música sonaba bien. Además, había a veces, prácticas casi supersticiosas, tales como colocar alambres (que no tenían ninguna función) en los lugares altos de una iglesia o auditorio.

Wallace Clement Sabine

La acústica arquitectónica moderna, nació a finales del siglo XIX gracias al físico americano Wallace Clement Sabine.

En 1895, cuando se inauguró el Museo de Arte Fogg, los miembros del consejo de la Universidad de Harvard, al comprobar que la acústica del recinto era pésima y que el discurso de los oradores era ininteligible, pidieron a Sabine que resolviera el problema.

Sabine llegó a la conclusión, que el problema residía en la excesiva reverberación de la sala. Para reducirla, cubrió las paredes con fieltro que es un absorbente acústico. Aunque no fue una solución ideal, la acústica mejoró y pudo utilizarse la sala.

Tras este logro, Sabine fue llamado para asesorar la construcción del nuevo Boston Symphony Hall. En el desarrollo de este proyecto, durante sus investigaciones, estableció una fórmula de cálculo del tiempo de reverberación que aplicó al recinto.

Cuando llegó el momento de la inauguración en 1900, Sabine se llevó una gran decepción, ya que el tiempo de reverberación de la sala no se ajustaba al que él había predicho teóricamente. Fue muy criticado por los medios de comunicación y por otros expertos en la materia.

Tras este fracaso Sabine abandonó sus investigaciones y volvió al mundo universitario, dedicándose a la enseñanza hasta su muerte en 1919.

Sin embargo, la historia colocó a Sabine en el lugar que merecía. En 1950, cincuenta años después de la construcción del teatro, se realizaron algunas pruebas y se pudo contrastar que los cálculos de Sabine eran correctos. De hecho, hoy en día (2005), el Boston Symphony Hall está considerado, desde el punto de vista acústico, como una de las mejores salas del mundo.

Después de Sabine

Muchos autores intentaron mejorar la ecuación del tiempo de reverberación para una sala y, aunque hay otras formulaciones que cuentan con aceptación, como la

de Eyring y Milligton, sin resultados mejores a los de Sabine; por lo que la fórmula de Sabine sigue en uso.

En los laboratorios Bell, E. N. Gilbert demostró que gracias a la utilización de una ecuación integral, se podía obtener un resultado por un procedimiento iterativo. Se han obtenido buenos resultados para ciertas aplicaciones.

A partir de 1968, se han desarrollado métodos informáticos de trazado de rayos sonoros con la idea de seguir todas las reflexiones que se producen y de esta forma calcular el tiempo de reverberación.

Tampoco estas técnicas recientes han dado resultados mucho mejores que las de Sabine. La fórmula de Sabine sólo ha sido mejorada al introducir un factor de absorción (x) del aire para una determinada temperatura y humedad. Factor que tiene gran importancia si se trata de grandes recintos.

Aunque Sabine es el padre de la acústica arquitectónica, se ha de tener en cuenta que la fórmula de Sabine ni es la única, ni tampoco es absolutamente fiable. Sólo se trata de una de las fórmulas más utilizadas.

Características acústicas de los estudios.

Las características acústicas de cada sala serán específicas para el uso que se le vaya a dar. Es importante que el campo sonoro de la sala sea difuso. Con ese fin, se pondrán difusores, absorbentes, aislantes que permitan redistribuir uniformemente el sonido y aproximarse al campo difuso ideal.

Las dos tendencias actuales principales aplicadas en el diseño de estudios de grabación son: Non-Environment y LEDE.

Desarrollada por Tom Hidley, a mediados de los Años 1980, para su proyecto de graduación en el Institute of Sound and Vibration Research de la Universidad de Southampton.

Su proyecto fue una sala semianecoica con una pared reflectante que soporte los altavoces (pantalla infinita), así el factor Q de los nodos en baja frecuencia es tan ancho que desaparece y la respuesta tonal de la sala es más uniforme.

Para evitar la excesiva utilización de absorbentes acústicos, se usa un sistema de guía de ondas, consistente en colocar los paneles alineados en la dirección de propagación. La principal ventaja es que en los estudios con estas características una misma grabación suena exactamente igual en dos estudios diferentes y que el refuerzo en graves es mayor.

LEDE (LIVE END - DEAD END), fue desarrollado por Don Davis y Caroline Davis hacia 1978. Como su propio nombre indica, se trata de crear a base de elementos absorbentes y difusores un recinto en el que la parte posterior del mismo tenga el mínimo posible de reflexiones (DEAD END) y la parte delantera sea reflectante (LIVE END), de tal manera que el sonido directo llegue a la posición de escucha lo más libre posible de reflexiones nocivas. Consiste en la utilización de absorbentes y reflectores acústicos con el fin de evitar que las reflexiones que produzcan interferencias en forma de peine o "comb-filters" (sumas de interferencias constructiva y destructivas) que se da cuando a una señal se le suman las réplicas de ellas, alterando la respuesta en frecuencia.

CAPITULO 12 SIMULACIÓN Y DISEÑO ACÚSTICO.

Lección 54: Generalidades Simulación acústica.

Cuando vamos a realizar un diseño de un recinto, o un tratamiento acústico de un recinto existente, necesitamos saber con exactitud que los materiales y diferentes técnicas que vamos a emplear van a funcionar, la única manera de poder predecir un poco esto, es a través de distintas técnicas de predicción empleadas en la actualidad, es la razón principal de la invención de la simulación acústica, la cual consiste en lograr moldear un recinto teniendo el control de su arquitectura, diseño y tipo de materiales; para lograr simular su acústica y evaluarla objetivamente.

Existen dos formas de modelar acústicamente un recinto ellas son:

- Simulación a Escala.
- Simulación a través de software.

Simulación a escala.

Esta técnica sugiere reconstruir un recinto a escala como en una maqueta teniendo en cuenta sus dimensiones, y materiales. Este modelo fue muy usado antes de la programación de los programas de simulación acústica. Actualmente no es muy usada.

Simulación a través de software.

Consiste en modelar un recinto a través de un software dedicado a este fin, existen varios tipos de software que se dedican a modelar recintos, su principio de funcionamiento está basado en las teorías de los rayos, y actualmente es la técnica más usada en modelado ya que se logran resultados sorprendentes. El software de simulación acústica, son costosos y requieren de un conocimiento de acústica alto para poder manipularlos.

Lección 55: Diseño acústico.

Cuando se necesita de un control exacto de los parámetros acústicos de acuerdo a las características funcionales de un proyecto (estudios de grabación, salas de música, de conferencia, gimnasios, etc.), Se debe partir de un diseño acústico integral teniendo en cuenta las consideraciones estéticas y funcionales del recinto.

El Diseño Acústico Personalizado es la mejor opción para una lograr una solución altamente satisfactoria por su rendimiento y estética. Tras estudiar las características del espacio en cuestión se realizan las siguientes tareas:

Medición y evaluación de las condiciones acústicas del espacio a tratar(si el recinto como tal ya existe).

Estudio de los aislamientos acústicos requeridos.

Simulación y auralización en programas de diseño acústico asistido, para evaluar las soluciones propuestas.

Desarrollo global de soluciones para el mejor acondicionamiento acústico.

Elaboración de planos para la construcción de dispositivos acústicos personalizados: tabiques para ventanas y puertas, paneles absorbentes, difusores unidimensionales y/o bidimensionales, resonadores, etc.

Dirección o asistencia para la aplicación de los diseños en la planificación del proyecto.

El Diseño Acústico Personalizado es una proceso que se desarrolla en contacto permanente entre el director general del proyecto y el especialista en acústica, en el que se realizan mediciones periódicas durante la evolución del mismo, ayudando a reducir costos y aumentando la efectividad de las soluciones acústicas aplicadas.

El campo de la Acústica Arquitectónica no está del todo desarrollado, ya que descansa fuertemente en juicios subjetivos y criterios estéticos. Aunque se han realizado medidas y experimentos, no parece fácil llegar a la definición definitiva de las características que hacen que una sala sea buena desde el punto de vista acústico. Sin embargo existen unas normas básicas que deberían cumplirse.

Reglas para obtener una buena acústica.

Modificar la Forma, orientación y material de las superficies en las que se puedan originar ecos y evitar que el sonido se concentre en puntos determinados.

Procurar que el sonido se distribuya uniformemente y que la intensidad sonora sea suficiente en toda la sala.

Evitar la aparición de ruidos de fondo, tanto internos como externos.

Favorecer las reflexiones en el escenario, de modo que las primeras ondas reflejadas se propaguen con muy corto retraso respecto del sonido directo.

Diseñar salas que mezclen los sonidos de forma que el sonido que llegue al oído izquierdo se diferente del que llega al oído derecho.

Lección 56: Parámetros de Diseño Acústico.

Vamos a ver algunos de los criterios que se utilizan en el diseño acústico de una sala. En la fase inicial, deben elegirse la forma y dimensiones del recinto compaginando al máximo los criterios acústicos y los estéticos. Es primordial definir las dimensiones en función del tiempo de reverberación óptimo y el aforo que tendrá la sala.

El techo es la mayor superficie que puede transmitir el sonido de forma homogénea hacia la audiencia. Su altura es vital en el diseño, ya que modifica el volumen de la sala y la transmisión adecuada del sonido hacia la audiencia. En una sala de conciertos suele situarse una placa reflectora detrás de la orquesta (tornavoz) y también se sitúan paneles reflectores en el techo para dirigir el sonido hacia la audiencia.

El suelo del auditorio debe tener la forma más adecuada para limitar el fenómeno de la difracción en las cabezas del público. Se puede demostrar que cuando se preserva la línea de visión del escenario para cada oyente, no sólo se mejora la percepción visual, sino también la auditiva. La disposición ideal del suelo de un auditorio para preservar las líneas de visión del público con el escenario es la espiral logarítmica, por lo que suelen utilizarse aproximaciones de esta curva.

Parámetros que modifican las cualidades acústicas de una sala

Existen varios parámetros que modifican la acústica de una sala. Algunos de ellos se basan en criterios objetivos, mientras otros lo hacen en parámetros más intangibles. Por esta razón no existe una acuerdo completo acerca de cuáles deben ser los valores de algunos de ellos para obtener una buena acústica.

Parámetros Objetivos.

Reflexión de las ondas sonoras en paredes y techos: Cuando hay muchas

superficies planas reflectoras se producen multitud de ondas reflejadas. Para reducirlas, es habitual colocar sobre las paredes y techo materiales absorbentes, que eviten ecos y valores demasiado altos del tiempo de reverberación.

Distribución uniforme del sonido: Requiere un cuidadoso diseño del auditorio y los materiales interiores, sobre todo bajo los anfiteatros, y una apropiada inclinación y cobertura del suelo.

I**ntensidad sonora suficiente en toda la sala:** la intensidad sonora producida en el escenario debe adecuarse al tamaño de la sala, con poca intensidad hay zonas en las que no se oye, con demasiada se produce un efecto estruendoso.

Un auditorio ideado para una orquesta sinfónica, puede no ser el mejor para un conjunto orquestal.

Eliminación de ruidos no deseados: Buen aislamiento al ruido exterior e interior.

Parámetros Subjetivos.

Intimidad: Se define como el inérvalo de tiempo entre la llegada del Sonido directo y la llegada del primer sonido reflejado en la sala. Se dice que ese tiempo no debe ser mayor de 20ms para que el público no se sienta aislado de la fuente.

Depende mucho de la altura y de los paneles reflectores suspendidos en los techos.

Dirección de la que llega el sonido Reflejado: Cada oyente es capaz de situar la fuente sonora especialmente si el sonido reflejado proviene de las paredes de la sala, es decir si el sonido percibido por los dos oídos es diferente, sin embargo no puede hacerlo si proviene del techo. Este hecho tiene relación con el ancho de la sala.

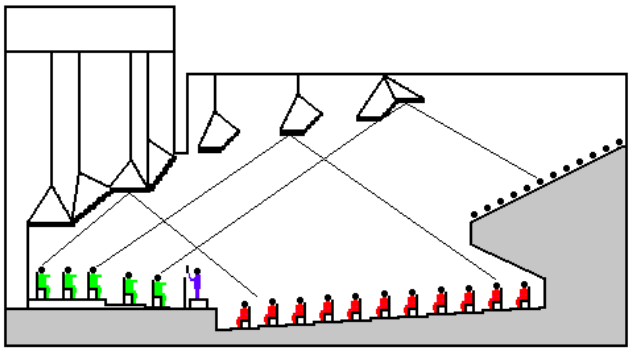

Figura 33. Reflexión del sonido con paneles reflejantes.

Defectos acústicos y formas caprichosas

En una sala, los ecos se producen a menudo en superficies planas orientadas en direcciones incorrectas, o en superficies cóncavas que tienden a concentrar el sonido en algunos puntos. Un efecto muy molesto se produce cuando dos paredes planas, buenas reflectoras del sonido, se sitúan una frente a otra. Un sonido que se produce entre estas dos paredes se refleja en ambas, rebota simultáneamente en una y otra, produciendo un eco similar a una vibración. Este efecto puede evitarse recubriéndolas con un material absorbente.

Para superficies cóncavas, dependiendo de la distancia de la fuente sonora a la pared y del radio de curvatura, puede producirse una focalización o una dispersión de los rayos reflejados en la pared. Por esta razón, cuando un conjunto orquestal se coloca frente a una pared curva, puede ocurrir que cada grupo de instrumentos sea reflejado en una dirección diferente a los demás, o que, debido a la focalización, la intensidad en algunos puntos de la sala sea muy grande y en otros puntos prácticamente nula. Estos efectos se producen en algunas construcciones, siendo quizás una de las más conocidas la galería de los susurros de la Catedral de San Pablo en Londres.

Lección 57: Simulación acústica a través de software.

Para poder analizar cualquier tipo de recinto, y poder obtener las variables Acústicas (Rt60, Rt30, rt20, C80, etc.). Existen una serie de programas que trabajan bajo el método de rayos. En los cuales, se ingresan las superficies del cuarto en un código de ingreso determinado por el tipo de programa, luego se procede a asignar los materiales a las distintas superficies… se ubica la fuente , los receptores y se analiza el ambiente.

Un vez logrados los valores predeterminados en el diseño, se puede realizar la Auralización, el cual nos da en cada posición de receptor, tras un proceso de deconvolucion, una idea de cómo “sonaría en cada posición de recepción” luego de ingresar la información musical más acorde a lo diseñado.

Lo interesante de estos programas, es que no hace falta que esté construido el recinto, siendo una opción muy buena al momento de proyectar la respuesta Acústica del Recinto en el momento del diseño y asignación de materiales.

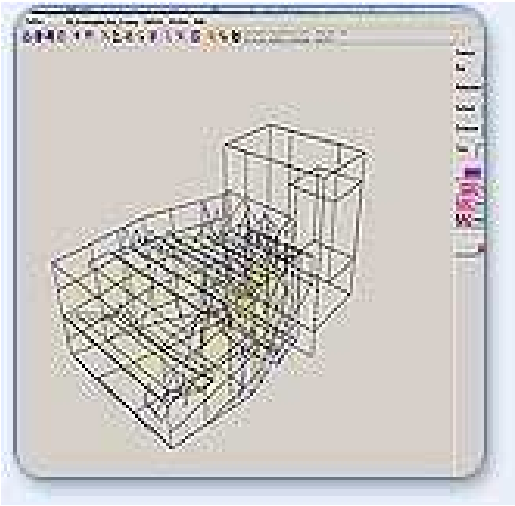

Figura 34. Simulación de un teatro en Odeón. (Software de Simulación Acústica).

Los software de simulación acústica, son unas herramientas muy potentes para el cálculo de modelos predictivos del impacto acústico de fuentes sonoras en

diferentes contextos.

Existe una amplia lista de software para:

•La modelización de todo tipo de emisores acústicos (industria, tráfico rodado, tráfico ferroviario, etc.) y así predecir, evaluar y estudiar el ruido ambiental y su impacto.

•La gestión de la inmisión de ruido de acuerdo con normativas tanto nacionales como internacionales, realizando mapas acústicos y estratégicos de ruido en aglomeraciones.

•El diseño y análisis de sistemas de acústica arquitectónica.

•El cálculo de ruido en naves industriales y recintos cerrados con presencia de fuentes de ruido

•El cálculo de la transmisión de ruido aéreo y de impacto entre estancias de un edificio, así como la transmisión de ruido aéreo desde el exterior.

•El cálculo del aislamiento acústico de paredes, ventanas, suelos y techos.

•El cálculo de la absorción acústica de sistemas en porosos con caras perforadas.

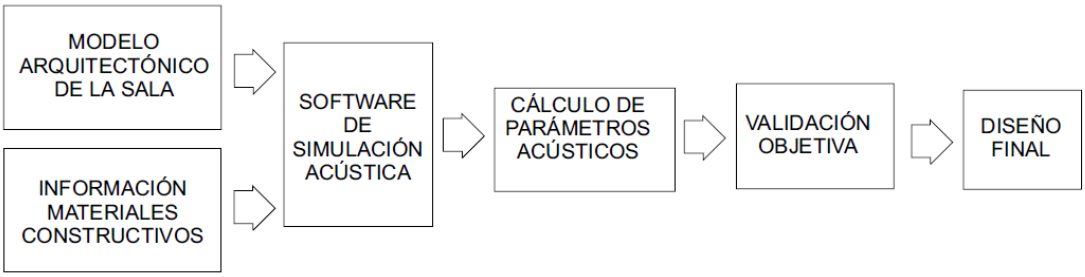

Figura 35. Proceso de simulación acústica de recintos.

Lección 58: Auralización.

"Auralización" es un término introducido en el año 1.990 por Mendel Kleiner, profesor e investigador de la Universidad Tecnológica de Chalmers (Göteborg, Suecia). Con este término se ha bautizado el proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual (antes de que dicho recinto se haya construido o remodelado). La mencionada escucha se puede efectuar mediante altavoces o, preferentemente, por medio de auriculares. La utilidad fundamental de la auralización se centra en el diseño acústico de un recinto, ya que permite comprobar auditivamente la calidad acústica fruto del diseño llevado a cabo, constituyendo un complemento al estudio teórico realizado mediante el programa de simulación.

La auralización es útil tanto en el análisis de recintos en fase de proyecto como en el de recintos ya existentes. En este último caso, constituye un medio de demostración del efecto auditivo que tendrían diferentes correcciones acústicas, ahorrando consideraciones técnicas a las personas no habituadas al lenguaje propio de la disciplina acústica.

Estructura de los sistemas de auralización

Auralización por convolución y la auralización mediante una unidad de reverberación digital. Ambos sistemas están basados en el conocimiento previo de la denominada respuesta impulsional h(t), comentada a continuación. La respuesta impulsional h(t) en un punto cualquiera de un recinto contiene toda la información sobre el campo sonoro en dicho punto. La h(t) depende tanto de la forma y de los materiales utilizados como acabados de la sala como de la posición de la fuente sonora y del receptor. El conocimiento de h(t) permite la obtención de la denominada auralización monoaural.

Ahora bien, con objeto de que la auralización sea lo más real posible, es preciso

conocer dos respuestas impulsionales:

➢ hR (t) = respuesta impulsional en el oído derecho del receptor

➢ hL (t) = respuesta impulsional en el oído izquierdo del receptor

El conocimiento de ambas respuestas posibilita la obtención de la auralización denominada binaural o estéreo. La determinación de la respuesta impulsional la lleva a cabo el programa de simulación acústica empleado.

Lección 59: Simulación acústica a Escala.

Antes de la invención de software de predicción acústica, en los años 60 se utilizaban para los estudios de acústica de salas, mediante modelos reducidos los modelos ópticos y los modelos acústicos. Los ópticos desarrollados por R. W. Leonard, normalmente eran bidimensionales aunque también si era necesario, se recurría a modelos tridimensionales. Una fuente de luz se localizaba en las localizaciones posibles de la fuente sonora, el contorno de la sala se formaba por franjas de material reflejante a la luz, aluminio, etc., Proporcionaban con cierta aproximación, información del avance de los frentes de onda de altas frecuencias y de la influencia del contorno del auditorio en ese avance, tras las reflexiones en paredes y techos sin embargo no eran adecuados para bajas frecuencias.

En la simulación acústica a escala, la relación entre longitud de onda del sonido y las dimensiones del recinto debe ser la misma en el modelo que en la sala real, es decir, si se quiere analizar la respuesta de una sala a la frecuencia de 250Hz, debería usarse una emisión de fuente en el modelo a escala de 2500Hz si ese modelo esta a una escala de 1/10. De hecho hubo que diseñar instrumentación adecuada para emitir y recibir sonidos de muy altas frecuencias para construir modelos a escala más pequeños (escala 1/16, 1/24). Como fuente se usaba una chispa (spark) eléctrica que proporciona una señal impulsiva de banda ancha omnidireccional, usando como receptores micrófonos omnidireccionales. La señal del micrófono se filtraba en la banda de frecuencia de interés. De este modo es posible obtener la respuesta al impulso de la sala a bajas medias y altas frecuencias.

http://books.google.com.co/books?id=GpMUJEM--HUC&pg=PA35&lpg=PA35&dq=modelo+a+escala+acustica&source=bl&ots=tkSvkvZ6LU&sig=hSj1ftTLvjtWtzx0XXUvfV8huhs&hl=es&ei=Yno9TfznN8OB8gbTrfCcCg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CBgQ6AEwAQ#v=onepage&q&f=false

Fuentes Documentales de la Unidad 4

- Acústica y Sistemas de Sonido, Ing. Federico Miyara. 1999.
- Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrot Isbert, 1998.
- Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía, Ángel Luis León Rodríguez, 2007.
- ABC de la Acústica Arquitectónica. Arau H, 1999.
- Acústica, Leo L Beranek, 1969.